
Optimierung eines geologischen 3D-Modells quartärer Sedimente unter Zuhilfenahme hydraulischer Daten am Beispiel der Hanau-Seligenstädter Senke (Südhessen)

Genehmigte Dissertation

am Fachbereich Material- und Geowissenschaften
der Technischen Universität Darmstadt
zur Erlangung des akademischen Grades
Doktor rerum naturalium (Dr. rer. nat.)



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DARMSTADT

vorgelegt von
Diplom-Geologin Ina Lewin (geb. Spottke)
geboren 1977 in Leipzig

Erstreferent: Prof. Dr. Andreas Hoppe
Korreferent: Prof. Dr. Christoph Schüth

Tag der Einreichung: 02.08.2016
Tag der Disputation: 06.12.2016

Darmstadt 2017
D17

Kurzfassung

Mächtige fluviale Sand- und Kiesablagerungen können ein bedeutendes Rohstoffvorkommen bilden und bieten zugleich Speicherplatz für ausgedehnte Grundwasservorkommen. Der Raum Babenhausen wird sowohl für die Gewinnung von Sand und Kies als auch für die Förderung von Trinkwasser genutzt. Aufgrund der räumlichen Nähe beider Rohstoffnutzungen zueinander und des damit verbundenen Gefahrenpotentials für das Grundwasser können Nutzungskonflikte auftreten.

Das Ziel der vorliegenden Arbeit war daher die Entwicklung eines detaillierten geologischen 3D-Modells sowie dessen Integration in ein ebenso detailliertes instationäres Grundwasserströmungsmodell. Auf diesem Wege sollte der Einfluss der Geologie, insbesondere der regionalen und lokalen Fazies-Differenzierungen und somit des Durchlässigkeitsbeiwertes auf die Grundwassergleichen und Fließpfade herausgefunden werden.

Zunächst erfolgten für Sedimentproben aus dem Arbeitsgebiet schichtbezogene Sieb- und Schlämmanalysen. Sie dienten, ebenso wie Multilevel-Pumpversuche auf einem neu angelegten Testfeld, der Bestimmung von Durchlässigkeitsbeiwerten. See- und Grundwasserspiegelmessungen sowie Multilevel-Temperaturmessungen wurden zur Gewinnung von Informationen über die See-Grundwasser-Interaktion durchgeführt. Die räumlichen Modellierungen der geologischen Einheiten sowie die Verteilung der Durchlässigkeitsbeiwerte im Raum erfolgten in GOCAD® und SKUA-GOCAD™. Nach einer Überführung dieser geologischen Daten in FEFLOW und der Hinzunahme der hydraulischen Daten konnte ein detailliertes instationäres Grundwasserströmungsmodell aufgesetzt sowie eine manuelle Sensitivitätsanalyse bezüglich des Parameters „Durchlässigkeitsbeiwert“ mit sechs verschiedenen Modellvarianten durchgeführt werden.

Die Modellvarianten M₁A (Seerand gut durchlässig, Verteilung der Durchlässigkeitsbeiwerte interpoliert) und M₃A (Seerand gut durchlässig, Verteilung der Durchlässigkeitsbeiwerte layerweise zониert) zeigen die beste Übereinstimmung zwischen gemessenen und berechneten Grundwasserspiegelständen. Der Einfluss der räumlichen Verteilung der Durchlässigkeitsbeiwerte auf die berechneten Grundwasserspiegelstände ist bei diesen beiden Modellvarianten zwar gering, führt aber dennoch zu einem deutlich unterschiedlichen Verlauf der Strömungslinien.

Oft wird auf Modelle zurückgegriffen um natürliche Ressourcen zu bewerten und Risikoabschätzungen durchzuführen. Das Ergebnis dieser Arbeit zeigt, dass Durchlässigkeitsbeiwerte möglichst umfangreich in hydrogeologische Modellierungen einbezogen werden sollten, um auch räumliche Zonierungen auf eine breite Basis stellen zu können, da sie einen großen Einfluss auf den Verlauf der Fließpfade haben.

Abstract

Fluvial sediments can form an important reservoir of sand and gravel. At the same time they may also contain a productive aquifer. Fluvial sediments in the Babenhausen area form such an important reservoir. Therefore this area is intensely used with dredging lakes and several pumping wells in operation. Consequently, a contamination of the groundwater by sand and gravel mining is possible due to its vicinity, and the risk potential should be estimated in order to avoid conflicting use.

The aim of this work was the development of a detailed geological 3D model and its integration in a detailed groundwater flow model in order to detect the influence on geology on water table contours and flow paths, especially on regional and local differentiations on facies and therefore on the spatial distribution of hydraulic conductivity in these sediments.

First of all, sieve and sedimentation analyses for sediment samples of the working area as well as multilevel pumping tests were carried out in a new test site. These investigations enabled locating zones with high hydraulic conductivities at specific depths. Information about the interaction between groundwater and lake water were carried out in the field by using hydraulic heads and multi-level high-resolution temperature measurements. Spatial modelling of geological units as well as spatial distribution of hydraulic conductivities were performed in GOCAD® and SKUA-GOCAD™. Afterwards geological data were transferred into FEFLOW. Together with hydraulic data a detailed groundwater flow model was developed. A manual sensitivity analysis of the parameter hydraulic conductivity with six different model variants was done.

Two model variations showed the best results in comparison between measured and calculated hydraulic heads: M1A was modelled with a well permeable lake shore and with spatial interpolated hydraulic conductivity, M3A was modelled with a well permeable lake shore and with a spatial zonation of hydraulic conductivity. The influence of the spatial distribution of hydraulic conductivities on the calculated heads is minimal but results in significant differences of flow directions.

Models are frequently used to assess natural resources and to conduct risk assessments. The result of this work indicates that a comprehensive implementation of hydraulic conductivities into hydrogeological modelling is recommended, because its spatial zonation has a great influence on the groundwater contours and flow directions.

Danksagung

Die vorliegende Arbeit entstand am Fachgebiet Geo-Ressourcen und Geo-Risiken des Institutes für angewandte Geowissenschaften der Technischen Universität Darmstadt im Rahmen des Projektes „Optimierung eines geologischen 3D-Modells quartärer Sedimente unter Zuhilfenahme hydraulischer Daten am Beispiel der Hanau-Seligenstädter Senke (Südhesen)“.

Die Arbeit wurde von Prof. Dr. Andreas Hoppe betreut. Ihm danke ich für viele wertvolle Ratschläge, für die Freiräume bei der Bearbeitung des Themas und für die Unterstützung bei der Entwicklung eigener Arbeitsansätze. Prof. Dr. Christoph Schüth danke ich für die Übernahme des Korreferats sowie für viele nützliche Hinweise und Empfehlungen.

Ohne die konstruktive Zusammenarbeit mit dem Zweckverband Gruppenwasserwerk Dieburg wäre diese Arbeit nicht möglich gewesen. Mein besonderer Dank gilt Dipl.-Ing. Ralf Picolin und Dipl.-Ing. Wolfram Wittwer.

Voraussetzung für die vorliegende Arbeit waren umfangreiche Arbeiten im Gelände und Labor. Für die vielzähligen Arbeiten auf dem Testfeld möchte ich mich gern bei Dr. Matthias Piepenbrink und Dipl.-Ing. Christoph Drefke bedanken. Dieses Testfeld befand sich auf dem Gelände der Sand- und Kieswerke Kaspar Weiss GmbH & Co – herzlichen Dank für die reibungslose Zusammenarbeit auf dem Gelände. Außerdem danke ich M. Sc. Hanna Kuhn, M. Sc. Georg Kuhn, M. Sc. Elisabeth Diehl, Dr. Dirk Arndt, Dipl.-Ing. Andreas Schuhmann, Gabriela Schubert und Dr. Markus Diehl für die hilfreiche Unterstützung bei Probenahmen, Messungen und Analysen in Gelände und Labor.

Zahlreiche fachliche mir sehr wichtige Diskussionen durfte ich mit Dr. Jens Hornung über die Georadardaten, mit Dr. Wolfram Rühaak über die Temperaturdaten und mit Dr. Laura Foglia über das Grundwassermodell führen. Auch hierfür ganz herzlichen Dank.

Mein besonderer Dank geht an die Kolleginnen und Kollegen des Fachgebietes Geo-Ressourcen und Geo-Risiken: Dr. Dirk Arndt, Dipl.-Geogr. Constanze Bückner, Dr. Monika Hofmann, Dr. Rouven Lehné, Dipl.-Geol. Marie-Luise Mayer-Reitz und Dipl.-Ing. Ulrike Simons. Ihre Hinweise und die Unterstützung in schwierigeren Projektphasen waren für das Fertigstellen dieser Arbeit besonders wichtig.

Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung	15
1.1. Ermittlung von Durchlässigkeitsbeiwerten.....	16
1.2. See-Grundwasser-Interaktion	17
1.3. Räumliche Modellierungen	18
2. Geologischer und hydrogeologischer Rahmen	20
2.1. Geologie.....	20
2.2. Hydrogeologie	24
3. Datengrundlage	26
3.1. Bohrungen	26
3.2. Karten und geologische Schnitte	26
3.3. Räumliche Modelle.....	27
4. Methoden.....	29
4.1. Anlage eines Testfeldes mit Grundwassermessstellen	30
4.2. Georadarmessungen im Testfeld	31
4.3. Ermittlung von Durchlässigkeitsbeiwerten.....	31
4.3.1. Sieb- und Schlämmanalysen	32
4.3.2. Pumpversuche	32
4.3.3. Abschätzung aus Bohrgutbeschreibungen	33
4.3.4. Vergleich der Methoden	33
4.4. Gewinnung hydraulischer Daten	34
4.4.1. Zeitreihen des Grundwasserspiegels	34
4.4.2. Zeitreihen der Grundwasserentnahme	35
4.4.3. Zeitreihen der Grundwassertemperatur	35
4.4.4. Markierversuch.....	36
4.5. Geologisches Basismodell	37
4.6. Geologisches Detailmodell.....	39
4.6.1. Erstellung des Volumen-Grids	39
4.6.2. Übertragung von Durchlässigkeitsbeiwerten in den Raum	41

4.6.3. Export des Detailmodells	42
4.7. Grundwasserströmungsmodell	43
4.7.1. Geometrischer Modellaufbau	43
4.7.2. Definition der Modellränder	46
4.7.3. Definition der Durchlässigkeitsbeiwerte	48
4.7.4. Definition weiterer Modelleigenschaften	49
4.7.5. Manuelle Sensitivitätsanalyse	49
5. Ergebnisse	51
5.1. Georadarmessungen im Testfeld	51
5.2. Ermittelte Durchlässigkeitsbeiwerte	54
5.2.1. Siebanalysen	54
5.2.2. Pumpversuche	54
5.2.2.1. Konventionelle Pumpversuche	54
5.2.2.2. Multilevel-Pumpversuche	57
5.2.3. Petrographische Schichtbeschreibungen	58
5.2.4. Vergleich der Ergebnisse	58
5.2.4.1. Konventionelle Pumpversuche versus Multilevel- Pumpversuche	59
5.2.4.2. Multilevel-Pumpversuche versus Siebanalysen	60
5.2.4.3. Siebanalysen versus petrographische Schichtbeschreibungen	61
5.2.5. Ergebnis des Vergleiches	62
5.3. Hydraulische Daten	65
5.3.1. Zeitreihen des See- und Grundwasserspiegels	65
5.3.2. Zeitreihen der See- und Grundwassertemperatur	67
5.3.3. Markierversuch	75
5.4. Geologisches Basismodell	77
5.5. Geologisches Detailmodell	80
5.5.1. Volumen-Grid	80
5.5.2. Verteilung der Durchlässigkeitsbeiwerte im Raum	82
5.5.3. Verteilung der Durchlässigkeitsbeiwerte im Detailmodell	84
5.6. Grundwasserströmungsmodell	85

5.6.1. Räumliche Verteilung der Durchlässigkeitsbeiwerte	85
5.6.2. Abschätzung der Modellqualität	89
5.6.2.1. Modellzuflüsse und Modellabflüsse.....	89
5.6.2.2. Beobachtungspunkte	91
5.6.3. Grundwassergleichenpläne im Einflussbereich des Brunnens B16	94
5.6.4. Interaktion zwischen See- und Grundwasser	97
5.6.5. Schlussfolgerungen.....	98
5.6.5.1. Grundwassergleichen und Fließwege	99
5.6.5.2. See-Grundwasser-Interaktion	99
5.6.5.3. Aussagekraft des Grundwassermodells.....	99
5.6.5.4. Fazit.....	100
6. Zusammenfassung, Schlussfolgerungen und Ausblick	101
Literatur	104
Anhang.....	109

Abbildungsverzeichnis

Abb. 1: Vereinfachte geologische Karte der Hanau-Seligenstädter Senke mit geologischem Schnitt.....	21
Abb. 2: Stratigraphischer Überblick mit Modellhorizonten und Modellschichten	23
Abb. 3: Grundwassergleichen im Raum Babenhausen im Oktober 2013 mit Testfeld und Brunnen B16	25
Abb. 4: Übersichtskarte des Basismodell-Gebietes mit Lageinformationen (Testfeld, Detailmodell, Grundwassermodell) und Datengrundlage (Bohrungen, geologische Schnitte).....	28
Abb. 5: Eingesetzte Methoden und Zusammenhänge zwischen den Arbeitsschritten	29
Abb. 6: Testfeld mit Grundwassermessstellen und Georadar-Bereich, Schnitt durch das Testfeld und den Brunnen B16	30
Abb. 7: Schematische Darstellung der Arbeitsschritte bei der Geomodellierung	38
Abb. 8: Umwandlung der Basis-Horizonte des Basismodells in Top-Horizonte des Detailmodells am Beispiel des Detailmodell-Horizontes Top Pliozän	40
Abb. 9: Umwandlung des Structural Model in ein Flow Simulation Grid	40
Abb. 10: Verteilung der Durchlässigkeitsbeiwerte über die Tiefe in 2 m-Klassen	41
Abb. 11: Regelmäßige Zelleckpunkte einer SKUA-GOCAD™-Gridsection des Detailmodells und FEFLOW-Supermesh mit FEFLOW-Nodes (generierte Dreiecksvermaschung) des Grundwasserströmungsmodells.....	44
Abb. 12: Transfer der Geometrien von SKUA-GOCAD™ zu FEFLOW durch Export der Zelleckpunkte pro SKUA-GOCAD™-Gridsection und Import der Eingangspunktensätze pro FEFLOW-Slice	45
Abb. 13: Vergleich der Struktur des Flow-Models im SKUA-GOCAD™-Grid mit der Struktur der FEFLOW-Slices.....	45
Abb. 14: Schematische Darstellung der Modellränder des Grundwasserströmungsmodells mit den Brunnen und verwendeten Grundwassermessstellen	46
Abb. 15: Beispiel-Ausschnitt der Brunnenfördermengen des Brunnen B16.....	47
Abb. 16: Regelmäßige Zelleckpunkte einer SKUA-GOCAD™-Gridsection des Detailmodells mit Eigenschaften im Zellzentrum sowie FEFLOW-Supermesh des Grundwasserströmungsmodells.....	48
Abb. 17: Radarfazies im Radargramm 94 mit charakteristischen Strukturgrößen.....	51
Abb. 18: Georadar-Block mit einer Detailmodell-Zelle (25 x 25 x 2 m) im 3D-Rahmen von 50 x 50 x 6 m	52

Abb. 19: Radarfazies im untersuchten Bereich des Testfeldes	53
Abb. 20: Modellkurve nach Theis (1935) für den ungespannten Aquifer, basierend auf der Entnahme im Brunnen B16 und den Zeit-Absenkungsdaten im Peilrohr des Brunnens B16	56
Abb. 21: Modellkurve nach Theis (1935) für den ungespannten Aquifer, basierend auf der Entnahme im Brunnen B16 und den Zeit-Absenkungsdaten in der Grund- wassermessstelle GWM_E	56
Abb. 22: Modellkurve nach Theis (1935) für den ungespannten Aquifer, basierend auf der Entnahme im Brunnen B16 und den Zeit-Absenkungsdaten in der Grund- wassermessstelle T2B.....	57
Abb. 23: Durch Multilevel-Pumpversuche in den Grundwassermessstellen T1B und T2B erzielte Absenkungen in den unterschiedlichen Tiefenbereichen mit exem- plarischen Zeit-Absenkungs-Kurven nach dem Verfahren von Neumann (1974) sowie den zugehörigen Transmissivitäten	58
Abb. 24: Durchlässigkeitsbeiwerte, ermittelt aus Korngrößenanalysen nach Białas und Kleczkowski (1970) (T1A und T2A) im Vergleich mit Durchlässigkeits- beiwerten, ermittelt aus Multilevel-Pumpversuchen nach Neumann (1974) (T1B und T2B).....	60
Abb. 25: Seewasserspiegel und Grundwasserspiegel im Testfeld	65
Abb. 26: Einfluss des Pumpbetriebes im Brunnen B16 auf den Grundwasserspiegel im Testfeld	66
Abb. 27: Temperaturen im See- und Grundwasser in acht verschiedenen Tiefen.....	68
Abb. 28: Grundwasserspiegel und Grundwassertemperaturen in TK4 und TK7 während des 36-stündigen Pumpversuches im Brunnen B16 mit einer Pumprate von 110 m ³ /h	69
Abb.29: Vertikale Temperaturprofile während eines Jahres (See- und Grundwasser).....	70
Abb. 30: Temperaturzeitreihen in den Grundwassermessstellen verglichen mit der Lufttemperatur.....	71
Abb. 31: Temperaturzeitreihen der Tiefen TK2-116,9 m, TK4-114,9 m, TK6-112,9 m und TK8-110,9 m über NN im Vergleich mit Seewassertemperaturen	74
Abb. 32: Räumliche Darstellung des Basismodells	77
Abb. 33: Volumetrische Darstellung des Basismodells	78
Abb. 34: Aufbau des Volumen-Grids (Flow-Model) über die vier Modell-Einheiten	80
Abb. 35: Geologische Einheiten im Volumen-Grid vom Liegenden zum Hangenden	81
Abb. 36: Verfügbarkeit an Durchlässigkeitsbeiwerten in den verschiedenen geologi- schen Modelleinheiten des Detailmodells.....	83

Abb. 37: Durchlässigkeitsbeiwerte im Volumen-Grid für die geologischen Einheiten vom Liegenden zum Hangenden	84
Abb. 38: Die Modellvarianten mit ihrer KF-Verteilung im räumlichen Überblick	85
Abb. 39: Die Modellvarianten mit ihrer KF-Verteilung im Layer 25	86
Abb. 40: Lage der Schnitte durch die Grundwassermessstellen im Modellgebiet sowie Lage der Seerandabschnitte	87
Abb. 41: Die Modellvarianten mit ihrer KF-Verteilung im NW – SE Schnitt	88
Abb. 42: Die Modellvarianten mit ihrer KF-Verteilung im W – E Schnitt	88
Abb. 43: Die Modellvarianten mit ihrer KF-Verteilung am Brunnen B16	89
Abb. 44: Vergleich der Modellzuflüsse und Modellabflüsse über die Zeit für die Modellvarianten	90
Abb. 45: Die Modellvarianten mit ihrer KF-Verteilung am westlichen Modellrand	91
Abb. 46: Vergleich von gemessenen und in sechs Modellvarianten berechneten Grundwasserspiegelständen für verschiedene Beobachtungspunkte	92
Abb. 47: Gemessene und berechnete Grundwasserspiegelstände in den Grundwassermessstellen T2B, 50160 und 50180 während des Pumpversuches im Brunnen B16	93
Abb. 48: Vergleich der gemessenen und berechneten Grundwasserspiegelstände für die Beobachtungspunkte im letzten Zeitschritt des Grundwassermodells, separiert nach A-Modellen und B-Modellen mit der Angabe des zugehörigen Root Mean Square	94
Abb. 49: Grundwassergleichen und Strömungslinien (Ausgangspunkt: Brunnen B16) für den letzten Zeitschritt des Grundwassermodells	95
Abb. 50: Strömungslinien (Ausgangspunkt: Grundwassermessstellen T2B und 50180) für den letzten Zeitschritt der Grundwassermodelle M1A, M2A und M3A separiert für die obere Filterstrecke und die untere Filterstrecke	97
Abb. 51: Zufluss und Abfluss über die vier Seerand-Abschnitte in der Modellvariante M3A	98
Anhang, Abb. A1: Geologisches Basismodell – Verbreitung und Höhenlage der Basis T6-T7-Terrasse	111
Anhang, Abb. A2: Geologisches Basismodell – Verbreitung und Höhenlage der Basis T1-T5-Terrasse	113
Anhang, Abb. A3: Geologisches Basismodell – Verbreitung und Höhenlage der Basis Pliozän	115
Anhang, Abb. A4: Geologisches Basismodell – Verbreitung und Höhenlage der Basis Oligozän	117

Tabellenverzeichnis

Tab. 1: Modellvarianten bei der manuellen Sensitivitätsanalyse bezüglich des Parameters „Durchlässigkeitsbeiwert“	50
Tab. 2: Erzielte Absenkungen des Grundwasserspiegels in den Grundwassermessstellen in verschiedenen Entfernungen zum Brunnen B16	55
Tab. 3: Ermittelte Transmissivitäten, daraus errechnete Durchlässigkeitsbeiwerte und Speicherkoeffizienten für den Brunnen B16 in drei verschiedenen Auswertungen	55
Tab. 4: Beispiele von ermittelten Durchlässigkeitsbeiwerten aus petrographischen Schichtbeschreibungen	59
Tab. 5: Vergleich der Transmissivitäten der konventionellen Pumpversuche mit den Summen der Einzeltransmissivitäten der Multilevel-Pumpversuche aus den Grundwassermessstellen T1B und T2B	59
Tab. 6: Durchlässigkeitsbeiwerte, basierend auf Siebanalysen im Vergleich mit Durchlässigkeitsbeiwerten, ermittelt über petrographische Bohrgutbeschreibungen in der Software GCI-PetroKF für die Grundwassermessstelle 50180 (Verfahren jeweils nach Białas und Kleczkowski 1970).....	61
Tab. 7: Vorteile und Nachteile der zur Ermittlung von Durchlässigkeitsbeiwerten in dieser Arbeit verwendeten Methoden	63
Tab. 8: Zeitverschiebung zwischen maximaler Lufttemperatur und maximaler Grundwassertemperatur in vier verschiedenen Tiefen der Grundwassermessstellen K1 und T2A.....	72
Tab. 9: Zeitverschiebung zwischen minimaler Seetemperatur und minimaler Grundwassertemperatur in vier verschiedenen Tiefen der Grundwassermessstellen K1 und T2A.....	72
Tab. 10: Flow per Layer für den Brunnen B16.....	96
Anhang, Tab. A1: Durchlässigkeitsbeiwerte aus Sieb- und Schlämmanalysen vom Testfeld	119
Anhang, Tab. A2: Durchlässigkeitsbeiwerte aus Sieb- und Schlämmanalysen von Rückstellproben.....	123
Anhang, Tab. A3: Durchlässigkeitsbeiwerte, errechnet aus Multilevel-Pumpversuchen im Testfeld	130
Anhang, Tab. A4: Durchlässigkeitsbeiwerte aus petrographischen Schichtbeschreibungen	132

1. Einleitung

Im Raum Babenhausen, südöstlich von Frankfurt am Main, befinden sich mächtige fluviale Sand- und Kiesablagerungen der Hanau-Seligenstädter Senke. Untersuchungen von Lang (2007) haben in der Hanau-Seligenstädter Senke eine Verlagerung des Mains von einer westlichen Lage im Pliozän zu einer östlichen Lage im Oberpleistozän nachgewiesen. Aufgrund dieser Verlagerung verzahnen sich im Raum Babenhausen fluviale Sedimente des Mains mit fluvialen Sedimenten lokaler Hochgebiete und bilden so eine heterogene Schichtfolge aus Ton, Sand und Kies. Für diesen quartären regionalen Mainterrassenaquifer konnte Bär (1985) eine mittlere Durchlässigkeit von $1,1 \cdot 10^{-3}$ m/s bei einem nutzbaren Porenvolumen von rund 15 % ermitteln. So bilden die fluvialen Sedimente ein bedeutendes Rohstoffvorkommen und bieten Speicherplatz für ausgedehnte Grundwasservorkommen. Dementsprechend wird der Raum Babenhausen sowohl für die Gewinnung von Sand und Kies als auch für die Förderung von Trinkwasser genutzt. Aufgrund der räumlichen Nähe beider Rohstoffnutzungen zueinander und des damit verbundenen Gefahrenpotentials für das Grundwasser können Nutzungskonflikte auftreten (Hoppe et al. 2006). In einer solchen Situation kann der Einsatz von Grundwasserströmungsmodellen helfen, das Gefahrenpotential abzuschätzen. Für eine optimale Bewirtschaftung des Untergrundes ist vorausgehend eine geologische 3D-Modellierung notwendig.

Für den Raum Babenhausen gibt es bislang kein Grundwasserströmungsmodell, das auf einem geologischen 3D-Modell basiert und die Heterogenität der Durchlässigkeitsbeiwerte auch über die Tiefe berücksichtigt. Ziel dieser Arbeit ist daher ein detailliertes geologisches 3D-Modell zu entwickeln und dieses in ein ebenso detailliertes instationäres Grundwasserströmungsmodell zu integrieren, um so – zum Einen – den Einfluss der Geologie (regionale und lokale Fazies-Differenzierungen) und somit des Durchlässigkeitsbeiwertes auf die Grundwassergleichen und Fließpfade herauszufinden und – zum Anderen – die Grundwasserströmungsverhältnisse zwischen Baggersee und Trinkwasserbrunnen auf eine mögliche Gefahrenlage hin zu untersuchen.

Hierfür ist es erforderlich, die regional charakteristischen Durchlässigkeitsbeiwerte zu kennen. Da für das Arbeitsgebiet aber bislang kaum Durchlässigkeitsbeiwerte bekannt waren, mussten diese zunächst ermittelt werden. Um zu den klassischen Pumpversuchen in Brunnen Ergänzungsmöglichkeiten zu finden, wurden Multilevel-Pumpversuche auf einem eigens dafür errichteten Testfeld erprobt und mit den Ergebnissen der durchgeführten Siebanalysen verglichen.

Um darüber hinaus Informationen zur Interaktion zwischen Baggersee und Grundwasser zu erhalten, wurde zusätzlich zu Messungen des See- und Grundwasserspiegels die Methode der hochaufgelösten tiefenorientierten Temperaturmessungen auf dem Testfeld erprobt und hinsichtlich der See-Grundwasser-Interaktion analysiert.

Dementsprechend lagen dieser Arbeit in drei Haupt-Arbeitsschritte zugrunde: Gelände- und Laborarbeit, geologische 3D-Modellierung sowie Modellierung der Grundwasserströmung.

Dabei stand zunächst die Erhebung von detaillierten hydrogeologischen und sedimentologischen Daten im Vordergrund, um Aussagen über charakteristische Durchlässigkeitsbeiwerte sowie die See-Grundwasser-Interaktion treffen zu können. Diese Informationen sind die Basis für ein geologisches 3D-Modell mit einer charakteristischen Verteilung von Durchlässigkeitsbeiwerten. Ein anschließender Daten-Transfer ermöglichte eine instationäre Grundwasserströmungsmodellierung zwischen Baggersee und Trinkwasserbrunnen mit dem Ziel der Erkundung präferentieller Fließpfade im Untergrund. Bei der Modellierung der Grundwasserströmung wurde bewusst auf eine Kalibrierung der Durchlässigkeitsbeiwerte verzichtet, um stattdessen das Modell in Szenarien auf seine Sensitivität bezüglich der Durchlässigkeitsbeiwerte zu prüfen, mit dem Ziel, auf diese Weise die Bedeutung von detaillierten Durchlässigkeitsbeiwerten für die Modellierung der Grundwasserströmung abzuschätzen.

Das Projekt erfolgte in enger Zusammenarbeit mit dem Zweckverband Gruppenwasserwerk Dieburg. Die Projektarbeit auf dem Testfeld (Siebanalysen und Pumpversuche) wurde von Dipl.-Ing. Christoph Drefke unter Betreuung von Dr. Matthias Piepenbrink unterstützt.

1.1. Ermittlung von Durchlässigkeitsbeiwerten

Die hydraulische Leitfähigkeit in heterogenen fluvialen Sedimenten ist aufgrund ihrer räumlichen Verteilung schwer erfassbar und zugleich ein wichtiger Parameter im Bereich der Grundwasser- und Transportmodellierung. Auf Grund dieser Bedeutung gibt es für die Ermittlung der hydraulischen Leitfähigkeiten des Untergrundes bereits zahlreiche Feld- und Laborversuche:

Brauchler et al. (2012) führten im Testfeld „Stegemühle“, einem gut charakterisierten Sand- und Kiesgrundwasserleiter, hydraulische Untersuchungen durch. Sie verglichen die laufzeitbasierte tomographische Inversion von Daten aus Kurzzeitpumpversuchen mit der analytischen Auswertung. Dabei fanden Sie heraus, dass sich in ihrem Testfeld mittels laufzeitbasierter tomographischer Inversion Änderungen der Diffusivitätsverteilung rekonstruieren lassen, während die analytische Auswertung der Kurzzeitpumpversuche keine Abgrenzung unterschiedlicher hydraulischer Eigenschaften ermöglichte. Händel und Dietrich (2012) ermittelten im Testfeld „Lauswiesen“, dass der Einsatz von Direct-Push Injection-Logging (DPIL) in ihrem Testfeld eine vertrauenswürdigere Charakterisierung der hydraulischen Durchlässigkeit ergab als Siebanalysen und Flowmeter-Daten. Beim DPIL handelt es sich um eine schnelle Methode zur vertikalen hydraulischen Charakterisierung heterogener Aquiferstrukturen in Lockersedimenten (Dietrich et al. 2008). Li et al. (2008) verwendeten Daten aus Flowmeter-Messungen und Pumpversuchen in ihrem Testfeld „Krauthausen“, um die hydraulische Leitfähigkeit unter Verwendung geostatistischer Methoden dreidimensional abzuschätzen. Diem et al. (2010) untersuchten einen alluvialen Schottergrundwasserleiter des voralpinen Thurtals (Schweiz) mittels Siebanalysen, Pumpversuchen, Slug-Tests sowie Flowmeter-Messungen und verglichen die Ergebnisse miteinander. Matthes et al. (2012)

beschäftigten sich mit den Auswirkungen von Messunsicherheiten bei der Korngrößenanalyse auf die Berechnung des Durchlässigkeitsbeiwertes. Fuchs (2010) entwickelte ein deterministisches Verfahren zur Ableitung des Durchlässigkeitsbeiwertes aus der petrographischen Beschreibung von Bohrschichtverzeichnissen, um so orts- und teufenbezogene Informationen zur Parametrisierung von Grundwassermodellen zu erhalten.

Im Raum Babenhausen gab es bislang kein Testfeld, in dem die hydraulische Durchlässigkeit der quartären Lockersedimente hochauflösend untersucht werden konnte. Dies ist aber besonders in dem Bereich von Interesse, in welchem die Gewinnung von Sand und Kies sowie die Förderung von Trinkwasser auf engem Raum stattfinden. Aus diesem Grund wurde in unmittelbarer Nähe zu einem Baggersee und einem Trinkwasserbrunnen ein Testfeld mit neuen Grundwassermessstellen aufgebaut. Auf dem Testfeld wurden in komplett verfilterten 1"-Grundwassermessstellen konventionelle Pumpversuche und Multilevel-Pumpversuche sowie anhand der gewonnenen Sedimentproben Siebanalysen durchgeführt, um so hochdurchlässige Zonen des Aquifers lokalisieren zu können. Zur Validierung und Korrelation der während der Multilevel-Pumpversuche ermittelten Parameter wurden die Ergebnisse mit den konventionellen Pumpversuchen und den Siebanalysen verglichen, um so Stärken und Schwächen der genutzten Methode aufzuzeigen.

1.2. See-Grundwasser-Interaktion

Oberflächenwasser ist normalerweise mit Grundwasser hydraulisch verbunden. Diese Interaktion wird von natürlichen Prozessen und menschlichen Aktivitäten beeinflusst, weshalb die Verschmutzung von Oberflächenwasser zu einer Verschmutzung des Grundwassers und umgekehrt führen kann (Winter et al. 1998). Oberflächenwassersysteme und Grundwassersysteme sind hoch dynamisch und Gradienten können, auch unter normalen Bedingungen, oft wechseln. Das kann zum Beispiel dazu führen, dass Flüsse zwischen einer gewinnenden Art (Grundwasser exfiltriert durch das Flussbett in den Fluss) und einer verlierenden Art (Flusswasser infiltriert durch die Sedimente in das Grundwasser) abwechseln (Kalbus et al. 2006). Als eine Konsequenz können sich auch die hydrochemischen Bedingungen in der hyporheischen Zone oft ändern, was zum Beispiel Auswirkungen auf redox-getriebene Reaktionen, mikrobielle Gemeinschaften oder das Boden-Wasser-Gleichgewicht haben kann (Engelhardt et al. 2011). Das Verständnis dieser Prozesse ist von zentralem Interesse für die Wasserwirtschaft, da sich Oberflächenwasser und Grundwasser meist erheblich in ihrer Qualität unterscheiden. Darum erfährt die Oberflächenwasser-Grundwasser-Interaktion ein ansteigendes Forschungsinteresse, dokumentiert in mehreren umfassenden Überblicken (Winter 1999, Woessner 2000, Sophocleous 2002, Fleckenstein et al. 2010).

Die größte Aufmerksamkeit ist in diesem Forschungsbereich allerdings auf die Fluss-Grundwasser-Interaktion gerichtet, weniger auf diejenige zwischen See- und Grundwasser. Durch die direkte Kopplung an den Niederschlag ist der Flussabfluss hoch variabel und führt zu po-

tentiell schnellen Gradient-Änderungen. Austauschprozesse zwischen Fluss- und Grundwasser variieren in Raum und Zeit (Huggenberger et al. 1998). Das hat einen Einfluss auf Morphologie und Krümmung des Flusses. Die damit verbundene Heterogenität der Flussbettsedimente sowie deren Durchlässigkeitsbeiwerte wirken sich auf Wasserflüsse und Durchflussmenge zwischen Fluss- und Grundwasser aus (Vogt et al. 2010).

Die Interaktion zwischen See- und Grundwasser folgt zwar den gleichen generellen Konzepten. Durch die größeren Volumen und geringeren Fließgeschwindigkeiten sind die Gradient-Änderungen aber gedämpft. Zusätzlich sind Seesedimente generell feinkörniger, was zu einer vergleichsweise dickeren Kolmationsschicht führt, deren geringe hydraulische Leitfähigkeit Austauschprozesse limitiert oder sogar zu einer Entkopplung der Seewasser- und Grundwasserdynamik führen kann (Lischeid et al. 2010).

Baggerseen zur Entnahme von Sedimenten weisen noch weitergehende Besonderheiten auf: sie haben gewöhnlicher Weise keinen Flusszulauf oder Flussablauf, sie legen aber den Grundwasserspiegel frei. Da die zu entnehmenden Sedimente typischerweise Sand und Kies sind, die jeweils einen hohen Durchlässigkeitsbeiwert aufweisen, stehen die Abbauaktivitäten oft im Konflikt mit der Trinkwasserproduktion aus diesen Grundwasserleitern. Es ist daher von besonderem Interesse, wie Baggerseen an das umgebende Grundwasser angebunden sind, um eine Risikoabschätzung für den Betrieb der nahen Trinkwasserbrunnen zu ermöglichen, die aus demselben Grundwasserleiter entnehmen.

Zur Bestimmung der Oberflächenwasser-Grundwasser-Interaktion werden in der neueren Forschung immer öfter natürliche Tracer eingesetzt. Die Wassertemperatur zum Beispiel, ist system-intrinsisch und kann in Grundwassermessstellen sowohl ohne großen Aufwand als auch über große Zeiträume gemessen werden (Molina-Giraldo et al. 2010). Umfassende Überblicke zu Theorie und Anwendung von Wärme als Tracer für den Grundwasser-Oberflächenwasser-Austausch werden zum Beispiel von Anderson (2005) und Hatch et al. (2006) gegeben.

1.3. Räumliche Modellierungen

Räumliche geologische Modellierungen sind heute vor allem im Bereich der Lagerstättenkunde (Erdöl und Bergbau) weit verbreitet. Sie kommen aber immer häufiger auch bei geologischen Studien zur Bewertung von natürlichen Ressourcen und/oder zur Gefährdungsabschätzung zum Einsatz (Caumon et al. 2009).

Lerch et al. (2007) etwa kombinierten die Erstellung eines räumlichen geologischen Modells mit einer Methode zur Ermittlung der Grundwasserschutzfunktion, um so eine flächendeckende Berechnung der Schutzfunktion zu ermöglichen. Lamelas et al. (2009) nutzten GIS-Technologien, um in der Nähe von Zaragoza (Spanien) geomorphologische Einheiten mit hoher Erosionsanfälligkeit und Einheiten mit hohem landwirtschaftliches Potential zu iden-

tifizieren, mit dem Ziel, diese Informationen in Planungsprozesse zur Landnutzung zu implementieren. Arndt et al. (2011) nutzten GOCAD®, um ein räumliches geologisches Modell von Hessen zu entwickeln. Diesem Modell wurden gesteins- und gebirgsphysikalische Parameter zugewiesen, um Geopotentiale dreidimensional zu identifizieren und zu visualisieren. Deren Verschnitt wiederum dient der Identifizierung potentieller Nutzungskonflikte oder Nutzungssynergien.

Grundlagen der geologischen räumlichen Modellierung mit ihrer Vielzahl an mathematischen Methoden, welche die Modellierung der Topologie, der Geometrie und der physikalischen Eigenschaften von geologischen Objekten in einer einheitlichen Form erlauben, beschreibt Mallet (2002). Weit verbreitete Softwarelösungen für geologische 3D-Modellierungen sind zum Beispiel SKUA-GOCAD™ (PARADIGM®), PETREL® (SCHLUMBERGER), GSI3D (INSIGHT) und OPENGEO SYS (Kolditz et al. 2012).

Räumliche Modellierungen der Grundwasserströmung kommen unter anderem bei der Ermittlung von Schutz- und Einzugsgebieten zum Einsatz, werden für die Prognose von Grundwasserstand-Veränderungen genutzt und stellen die Basis für Transportmodelle dar. Außerdem werden sie bei der Bilanzierung von Wasserflüssen und für die Auslegung von Sanierungsmaßnahmen eingesetzt. Weit verbreitete Softwarelösungen für die Modellierung der Grundwasserströmung sind etwa MODFLOW (Harbaugh 2005), PMWIN (Chiang 2005), ASM (Kinzelbach und Rausch 1995) und FEFLOW (Diersch 2014).

Die Vertrauenswürdigkeit von Grundwassermodellen hängt zu einem großen Teil von der Vorhersage-Fähigkeit der geologischen Strukturen ab, die den Grundwasserfluss kontrollieren (Spottke et al. 2005). Die Einbeziehung von komplexer Geologie (Störungssysteme, Karstgebiete und Lockersedimente) in der Grundwassermodellierung kann sich mit den gängigen Softwarelösungen für die Modellierung der Grundwasserströmung schwierig gestalten. Daher werden zunehmend geologische 3D-Modelle des oberflächennahen Untergrundes mit speziellen Softwarelösungen in Vorbereitung auf die Modellierung der Grundwasserströmung erstellt. Anschließend werden die geologischen 3D-Modelle auf unterschiedlichen Wegen in Softwarelösungen für die Modellierung der Grundwasserströmung transferiert und darin integriert (Spottke et al. 2005, Butscher und Huggenberger 2007, Hubert 2011, Panteleit et al. 2013, Wycisk et al. 2009).

2. Geologischer und hydrogeologischer Rahmen

2.1. Geologie

Südöstlich von Frankfurt am Main befindet sich die Hanau-Seligenstädter Senke, ein känozoischen Randbecken des Oberrheingrabens, welches von Spessart, Odenwald und Sprenslinger Horst begrenzt wird (Abb. 1a). Die geologischen Schichten innerhalb dieser Senke zeigen mehrheitlich horizontale Lagerungsverhältnisse (Abb. 1b). Einen stratigraphischen Überblick hierzu liefert Abb. 2.

Untersuchungen von Lang (2007) haben in der Hanau-Seligenstädter Senke eine Verlagerung des Mains von einer westlichen Lage im Pliozän zu einer östlichen Lage im Oberpleistozän nachgewiesen. Aufgrund dieser Verlagerung verzahnen sich im Raum Babenhausen fluviale Sedimente des Mains mit fluvialen Sedimenten lokaler Hochgebiete und bilden so eine heterogene Schichtfolge aus Ton, Sand und Kies.

Im Untergrund der Hanau-Seligenstädter Senke befinden sich das variszische Grundgebirge der Mitteldeutschen Kristallinzone und die diskordant auflagernden Schichten des Oberen Rotliegend bis zum Buntsandstein (Lang 2007). Sie werden als prä-paläogene Gesteine zusammengefasst (Abb. 1b).

Oligozäne und miozäne Sedimente sind in der Hanau-Seligenstädter Senke flächenhaft verbreitet (Lang 2007). Im südlichen Teil der Senke bildet die Randverwerfung der Stockstadt/Groß-Umstädter Scholle die östliche Verbreitungsgrenze (Anhang, Abb. A4). Die oligozänen und miozänen Sedimente der Hanau-Seligenstädter Senke weisen eine maximale Mächtigkeit von mindestens 280 m auf (Lang 2007).

Die pliozänen Sedimente treten in der Hanau-Seligenstädter Senke in Rinnenstrukturen auf, die Hauptrinne ist 9 km breit und verläuft aus dem Mittelmaintal kommend aus Richtung Südost nach Nordwest (Lang 2007). Bei den typischen oberpliozänen Sedimenten handelt es sich um postmarine Sedimente, die sich aus grauen und gelblichen kalkfreien Sanden zusammensetzen, welche gelegentlich Gerölle enthalten (Scheer 1976).

Das Pleistozän ist von Flussterrassen geprägt und weist eine Mächtigkeit von bis zu 45 m auf. Nach Lang (2007) können die unter- und mittelpleistozänen Ablagerungen der Terrassen T₁, T₂, T₃, T₄ und T₅ sowie die oberpleistozänen Ablagerungen der Terrassen T₆ und T₇ unterschieden werden. Die Verbreitung der unter- und mittelpleistozänen Ablagerungen ist nach Lang (2007) flächenhaft sowie auf den mittleren und südlichen Teil der Hanau-Seligenstädter Senke begrenzt (Abb. 1a). Die oberpleistozänen Sedimente sind in Rinnenstrukturen abgelagert und bilden die Böden der heutigen Flusstäler (Lang 2007).

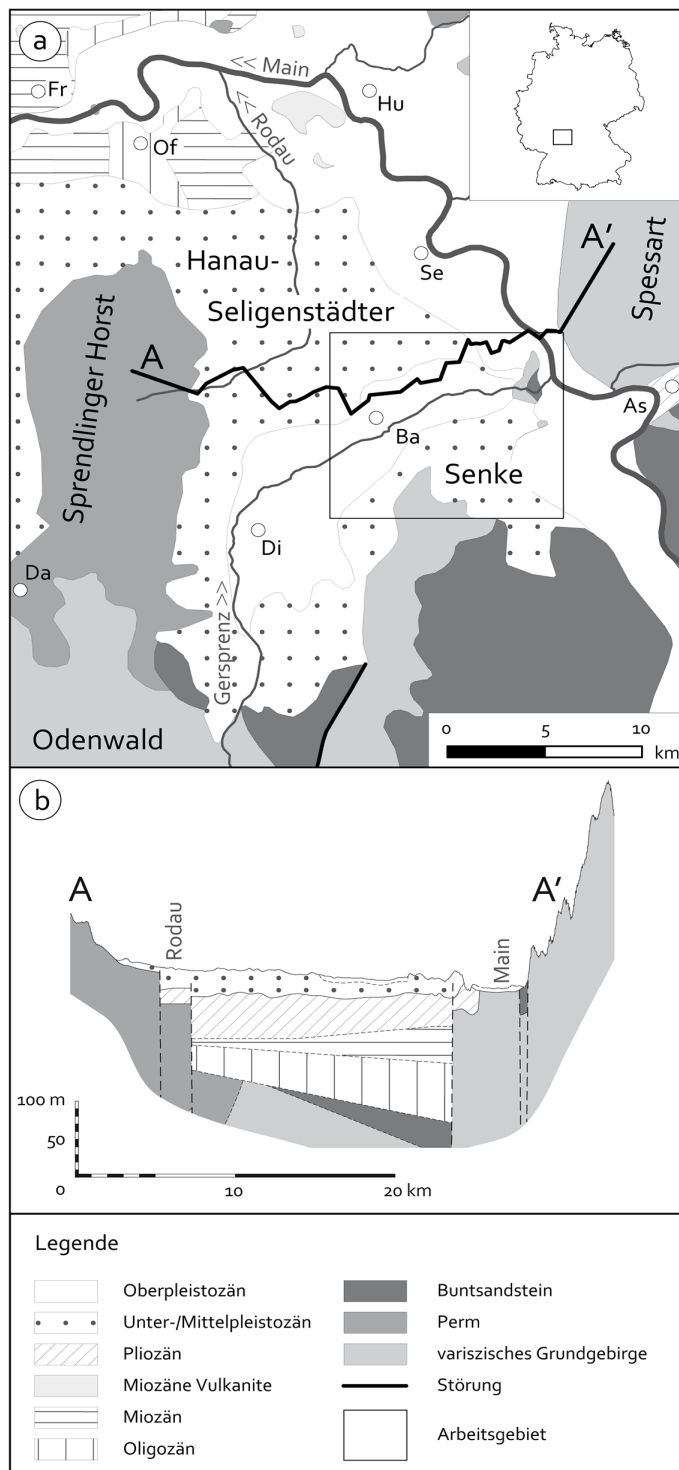


Abb. 1: Vereinfachte geologische Karte der Hanau-Seligenstädter Senke mit geologischem Schnitt (verändert nach Lang (2007), As-Aschaffenburg, Ba-Babenhhausen, Da-Darmstadt, Di-Dieburg, Fr-Frankfurt, Hu-Hanau, Of-Offenbach, Se-Seligenstadt)

Lang (2007) führte für die Hanau-Seligenstädter Senke eine 3D-Architekturelementanalyse durch, um beispielsweise Sequenzgrenzen und regionale Diskordanzen zu identifizieren. Für eine Gliederung des Sedimentbeckens wählte er einen sequenzstratigraphischen Ansatz in Anlehnung an Ramón und Cross (1997), der die Dynamik des Ablagerungssystems berücksichtigt indem er auf dem unterschiedlichen Erhaltungspotential verschiedener Architekturelemente beruht.

So gliederte Lang (2007) die Hanau-Seligenstädter Senke in sogenannte A/S-Zyklen, wobei A für Akkommodationsrate und S für Sedimentzufuhr rate steht. Innerhalb eines solchen A/S-Zyklus verändert sich die A/S-Rate über die Zeit. Sinkt die A/S-Rate, nimmt der Akkommodationsraum eingetragenes Sediment weniger gut auf, da sich die Rinnen schnell verlagern. Dadurch erhöht sich der Amalgamationsgrad. Steigt die A/S-Rate an, kann der Akkommodationsraum eingetragenes Sediment besser aufnehmen. Da sich Rinnen weniger schnell verlagern, bleibt ein größerer Anteil anderer Architekturelemente erhalten.

Lang (2007) unterschied insgesamt drei A/S-Großzyklen: Pliozän, Unter- bis Mittelpleistozän (T₁) und Mittel- bis Oberpleistozän (T₂ bis T₇). Er wies darauf hin, dass die Zyklen T₂ bis T₇ teilweise mit dem T₁-Zyklus verschmolzen sind, weshalb sie sich nur schwer von diesem abgrenzen lassen. Auch für den T₁-Zyklus selbst kann Lang (2007) nicht ausschließen, dass es sich um einen Komplex amalgamierter Zyklen handelt.

Daher werden in dieser Arbeit die Terrassen, basierend auf A/S-Großzyklen, voneinander abgetrennt, das heißt, die Terrassen T₁ bis T₅ sowie die Terrassen T₆ bis T₇ werden in dieser Arbeit zusammengefasst (siehe Modelleinheiten in Abb. 2).

Ära	System		Serie		Formation/Schicht		Modell-Schicht		Horizont	
Känozoikum	Quartär	Pleistozän	Oberpleistozän	T7		1	1			
				T6						
			Mittelpleistozän	T5		2				
				T4						
				T3						
				T2						
				T1						
			Unterpleistozän							
	Tertiär	Neogen	Pliozän	Oberpliozän	Limnisch-fluviatile Wechselfolge		3	2		
				Mittelpliozän						
				Unterpliozän						
			Miozän	Obermiozän	Hiatus		4		3	
				Mittelmiozän						
				Untermiozän	Niederrad-Formation (Landschneckenmergel)					
					Obere Hydrobien-Schichten					
					Wiesbaden-Formation (Untere Hydrobien-Schichten)					
					Rüssingen-Formation (Inflata-Schichten)					
		Paläogen	Oligozän	Oberoligozän	Sulzheim-Formation (Cyrenenmergelgruppe)		4	4		
				Unteroligozän	Stadecken-Formation (Cyrenenmergelgruppe)					
					Bodenheim-Formation (Rupelton)					
					(Unterer Meeressand/Meereskalk)					
			Eozän							
			Paläozän							
			Prä-Känozoikum			Variszisches Grundgebirge sowie Rotliegend bis Oberer Buntsandstein				

Abb. 2: Stratigraphischer Überblick mit Modellhorizonten und Modellschichten (abgeänderte stratigraphische Tabelle nach Lang (2007))

2.2. Hydrogeologie

In der Untermainebene lässt sich die Basis des Grundwasserkörpers durch Festgestein abgrenzen. Diese Festgesteinsbasis besteht aus Kristallin, das örtlich von Gesteinen des Perms und des Buntsandsteins überlagert wird (Regierung von Unterfranken/Regierungspräsidium Darmstadt 1999). Der auf der Festgesteinsbasis lagernde Grundwasserkörper setzt sich aus marinen, limnischen und fluviatilen Ablagerungen des Tertiärs sowie sandig-kiesigen Terrassensedimenten des Quartärs zusammen.

Die sehr gut durchlässigen quartären Sedimente und die stark durchlässigen Bereiche im oberen Teil des Tertiärs bilden den Hauptgrundwasserleiter. Innerhalb des Tertiärs tritt in der Untermainebene örtlich ein tieferes Grundwasserstockwerk auf (Regierung von Unterfranken/Regierungspräsidium Darmstadt 1999). Für den quartären regionalen Mainterrassenaquifer konnte Bär (1985) eine mittlere Durchlässigkeit von $1,1 \cdot 10^{-3}$ m/s bei einem nutzbaren Porenvolumen von rund 15 % ermitteln. Die Flurabstände liegen mehrheitlich zwischen 6 m und 10 m, können in Flussnähe (Main und Gersprenz) aber flurnah sein oder wenige Meter betragen. Hin zu Odenwald, Spessart und höheren Terrassen kann der Flurabstand über 20 m steigen (Regierung von Unterfranken/Regierungspräsidium Darmstadt 1999).

Der regionale Grundwasserstrom fließt von Südwest nach Nordost in Richtung Main und wird regelmäßig in Grundwassermessstellen des Hessischen Landesamtes für Naturschutz, Umwelt und Geologie (HLNUG) sowie der lokalen Wasserversorger überwacht (Abb. 3).

Rund um Babenhausen betreiben mehrere Unternehmen einen Sand- und Kiesabbau (Abb. 3). Der Abbau erfolgt mittels Schwimmbagger im Nassabbau. Die dabei entstehenden Seen werden im Folgenden Baggerseen genannt. Zudem befinden sich im Projektgebiet Trinkwasserbrunnen des Zweckverbandes Gruppenwasserwerk Dieburg (Abb. 4). Der Brunnen B16 liegt dabei mit einer Entfernung von 410 m einem Baggersee am nächsten.

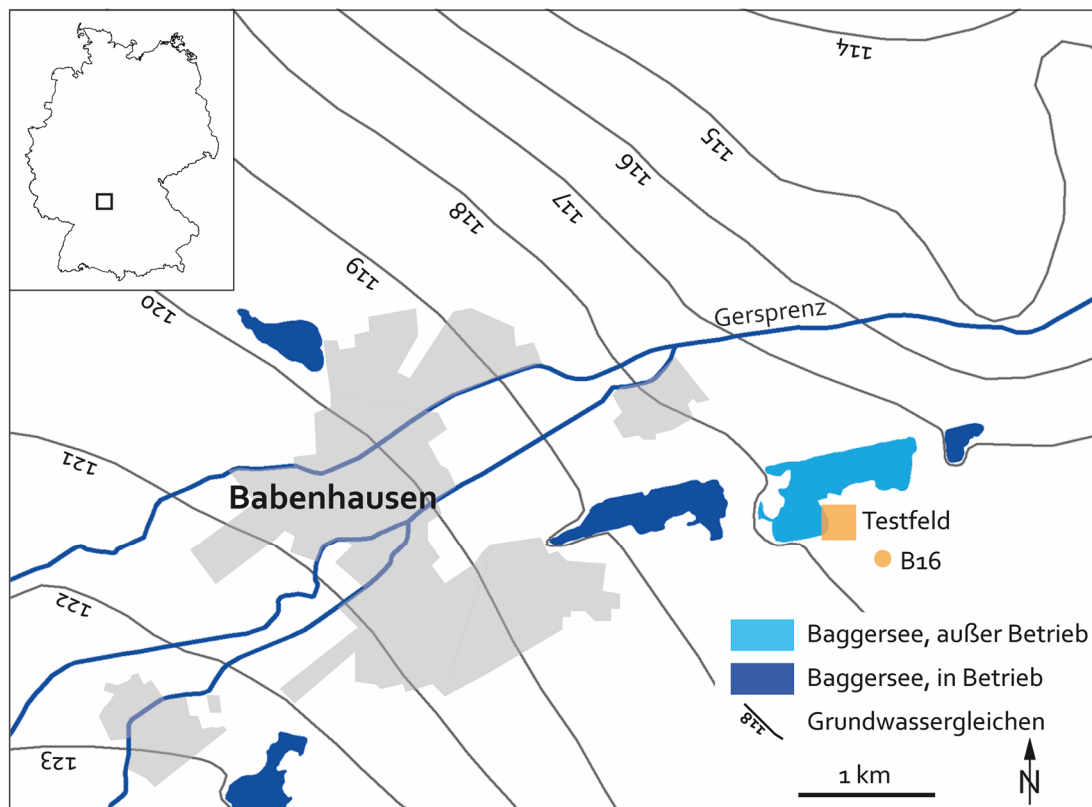


Abb. 3: Grundwassergleichen im Raum Babenhausen im Oktober 2013 mit Testfeld und Brunnen B16 (Grundwassergleichenplan des Hessischen Landesamtes für Naturschutz, Umwelt und Geologie, verändert)

3. Datengrundlage

Das Arbeitsgebiet erstreckt sich über eine Fläche von 12 x 10 km und entspricht in der Fläche dem geologischen Basismodell. Für das Arbeitsgebiet lagen sowohl Rohdaten (Bohrungen) als auch Ergebnisdaten (Karten, Schnitte und 3D-Modelle) vor (Abb. 4), die bei der Erstellung des geologischen Basismodells berücksichtigt wurden.

Im Zentrum des Arbeitsgebietes befinden sich das geologische Detailmodell und das Grundwasserströmungsmodell. Die für ihre Erstellung benötigten Daten mussten zunächst ermittelt werden (Durchlässigkeitsbeiwerte, Grundwasserspiegelstände usw.; siehe dazu Kapitel 4).

3.1. Bohrungen

Die verwendeten Bohrrdaten stellte das Hessische Landesamt für Naturschutz, Umwelt und Geologie zur Verfügung (HLNUG, Datenstand: 03/2011). Es handelt sich hierbei um 1182 Bohrungen innerhalb des Arbeitsgebietes, davon 941 Bohrungen mit stratigraphischen Informationen (Abb. 4).

Von diesen Bohrungen entfallen 57 Bohrungen mit petrographischer Schichtbeschreibung auf den Bereich des Detailmodellgebietes. Der Zweckverband Gruppenwasserwerk Dieburg stellte zusätzlich die petrographischen Schichtbeschreibungen und Rückstellproben zu 14 Bohrungen zur Verfügung. Außerdem konnten 10 Bohrungen aus der Arbeit von Lang (2007) integriert werden. Insgesamt lagen 81 Bohrungen innerhalb des Detailmodellgebietes mit 756 Schichtbeschreibungen vor (31 Bohrungen mit Tiefen zwischen 25 m und 50 m; 3 Bohrungen mit einer Tiefe > 50 m).

3.2. Karten und geologische Schnitte

Lang (2007) entwickelte geologische Karten ausgewählter stratigraphischer Schichtflächen in der Hanau-Seligenstädter Senke mit der Software ArcGIS. Zudem konstruierte er eine Vielzahl geologischer Schnitte durch die Hanau-Seligenstädter Senke. Die geologischen Karten decken das Basismodellgebiet komplett ab, die geologischen Schnitte liegen zum Teil im Basismodellgebiet (siehe Abb. 4). Das digitale Höhenmodell basiert auf dem DGM40. Diese Daten stellte das Hessische Landesamt für Naturschutz, Umwelt und Geologie zur Verfügung.

3.3. Räumliche Modelle

Die strukturelle und sedimentäre Architektur der Hanau-Seligenstädter Senke wurde, basierend auf 3500 Bohrungen, von Lang (2007) mit einem sequenzstratigraphischen Ansatz untersucht. Er entwickelte mit der Software GOCAD® ein räumliches geologisches Modell für die Hanau-Seligenstädter Senke, welches die komplizierten Sedimentabfolgen (hohe Faziesvariabilität und komplexe sedimentäre Architektur) stratigraphisch gliedert.

Das räumliche geologische Modell der Hanau-Seligenstädter Senke von Lang (2007) berücksichtigt die in Kapitel 3.2 erwähnten geologischen Karten und geologischen Schnitte von Lang (2007) allerdings nicht.

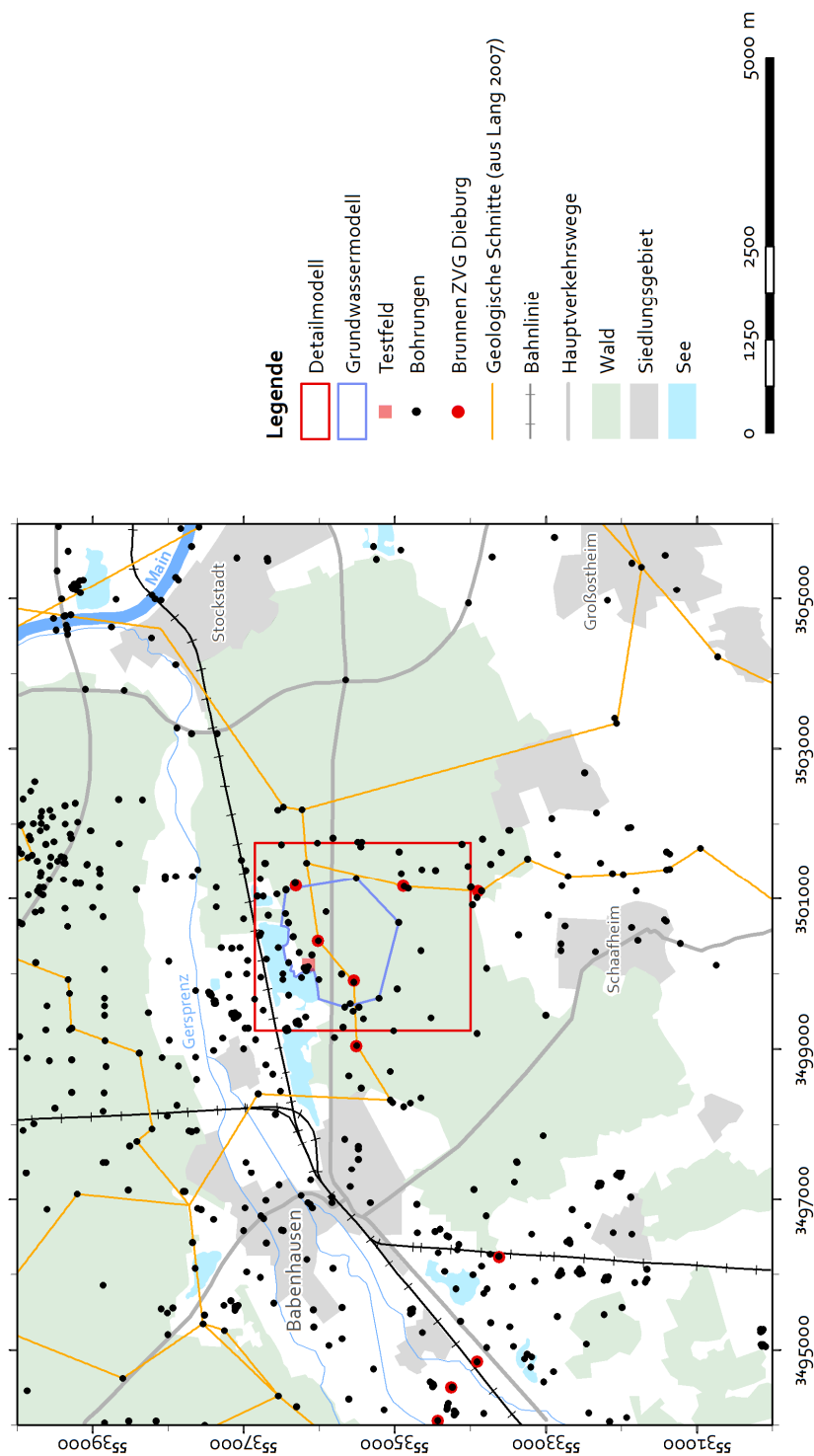


Abb. 4: Übersichtskarte des Basismodell-Gebietes mit Lageinformationen (Testfeld, Detailmodell, Grundwassermodell) und Datengrundlage (Bohrungen, geologische Schnitte); (Bohrdaten des Hessischen Landesamtes für Naturschutz, Umwelt und Geologie)

4. Methoden

In drei Arbeitsschritten des Forschungsprojektes (Gelände- und Laborarbeit, geologische 3D-Modellierung und Modellierung der Grundwasserströmung) wurden sowohl vorhandene als auch neu gewonnene Daten ausgewertet, bewertet und in räumlichen Modellen weiterverarbeitet. Die Zusammenhänge zwischen den einzelnen Arbeitsschritten zeigt Abb. 5. Die eingesetzten Methoden werden im Nachfolgenden beschrieben.

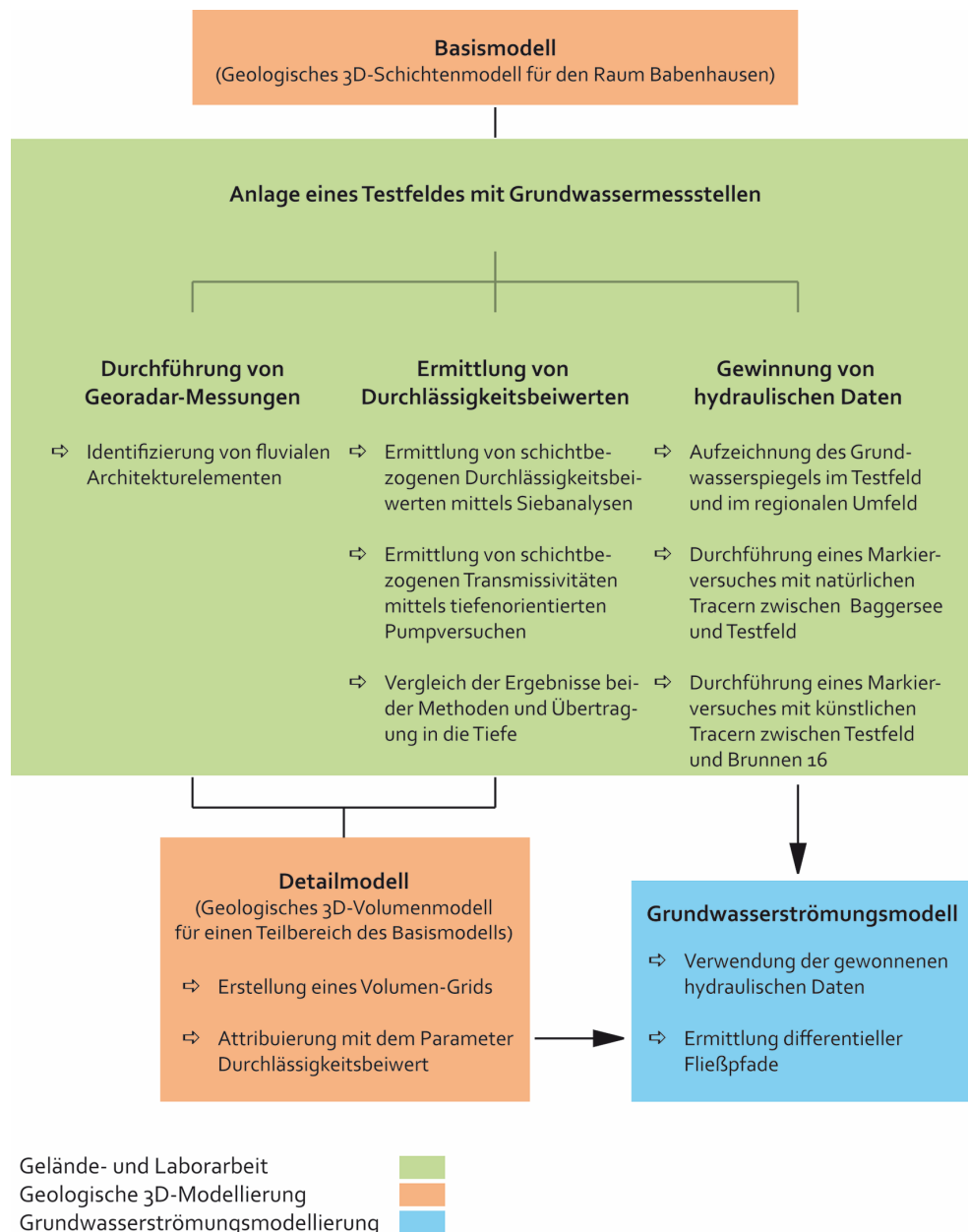


Abb. 5: Eingesetzte Methoden und Zusammenhänge zwischen den Arbeitsschritten

4.1. Anlage eines Testfeldes mit Grundwassermessstellen

Östlich von Babenhausen liegen der Baggersee eines örtlichen Sand- und Kieswerkes sowie der Brunnen B16 des Zweckverbandes Gruppenwasserwerk Dieburg in einer Entfernung von 410 m zueinander (Abb. 3 und 4). Im unmittelbaren Uferbereich wurde zwischen Baggersee und B16 ein circa 40 m x 50 m großes Testfeld errichtet (Abb. 6).

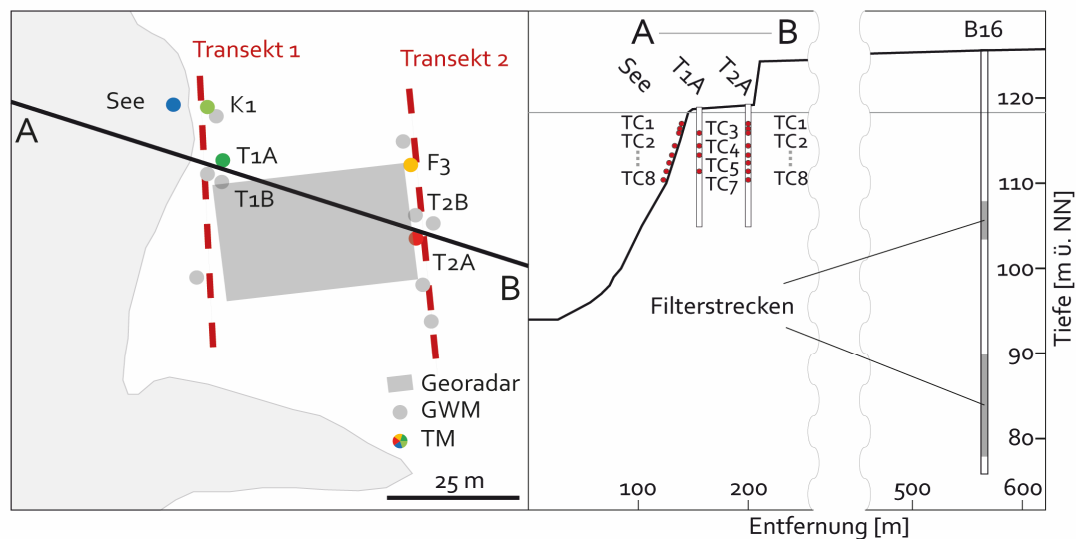


Abb. 6: Testfeld mit Grundwassermessstellen (GWM=Grundwassermessstelle, TM=Temperaturmessstelle) und Georadar-Bereich, Schnitt durch das Testfeld und den Brunnen B16

Auf dem Testfeld wurde unter Verwendung von direct push-Technik (Dietrich und Leven 2006) ein Messnetz bestehend aus 1"- und 1 1/4"-Grundwassermessstellen eingerichtet sowie Sedimentproben entnommen.

Beim Rammen der 1 1/4"-Grundwassermessstellen (T1A und T2A) in circa 15 m Tiefe kam das Dual Tube-Verfahren zum Einsatz. Beim diesem Verfahren werden zwei ineinander gestellte Gestänge verwendet. Ein äußeres 3 1/4"-Hohlgestänge, welches dem Rammfortschritt durch Übertragung der Hammerkraft dient und ein inneres, das einen Liner enthält, aus welchem kontinuierlich nahezu ungestörte Bodenproben gewonnen werden können. Bei den 8,0 m – 25,0 m tiefen 1"-Grundwassermessstellen (T1B, T2B, F3 und K1) kam das Lost-Tipp-Verfahren zum Einsatz. Bei diesem Verfahren wird das Sediment nicht entnommen sondern verdrängt. Zusätzlich wurden sieben oberflächennahe 1"-Beobachtungsrohre sowie eine Seewassermessstelle errichtet.

Die voll verfilterten Messstellen bestehen aus HDPE-Filterrohren mit einer Schlitzweite von 0,3 mm. Sie bilden zwei annähernd Nord-Süd verlaufende Transekte (Abb. 6). Der westliche Transekt befindet sich in einer Entfernung von 5 m zum Baggersee, der östliche Transekt liegt 55 m vom Ufer entfernt. Grundwasserspiegelmessungen zeigten einen Flurabstand von annähernd 1 m.

Die Vermessung der X-, Y-, Z-Koordinaten der See- und Grundwassermessstellen erfolgte im regionalen Messnetz durch die TPI Vermessungsgesellschaft mbH im Auftrag des Zweckverbandes Gruppenwasserwerk Dieburg.

Der Brunnen B16 erreicht eine Endteufe von 50 m. Die eingebauten Brunnenrohre haben einen Durchmesser von 400 mm mit zwei Filterstrecken in den Tiefen 18,0 m – 22,5 m und 36,0 m – 48,0 m. Im Brunnen B16 beträgt die durchschnittliche Fördermenge 85 m³/h.

4.2. Georadarmessungen im Testfeld

Die Methode der Georadarmessungen samt ihren physikalischen Eigenschaften ist mehrfach beschrieben (z.B. Davis und Annan 1989, Huggenberger 1993, Jol und Bristow 2003). Bei den Messungen auf dem Testfeld kam das Georadargerät SIR 2000 (Geophysical Survey Systems, Inc.) mit geschirmten 200 MHz-Antennen zum Einsatz.

Auf dem Testfeld erfolgte die Messung von insgesamt 53 Radargrammen auf einer 47 m mal 29 m großen Fläche zwischen Transekt 1 und Transekt 2 (Abb. 6). Die Messanordnung bestand aus 30 Linien (47 m lang) im 1 m-Abstand von WSW nach ENE und 10 Linien (29 m lang) im 5 m-Abstand von NNW nach SSE.

Auf dem Testfeld fand zusätzlich eine Common-Midpoint-Messung mit der Multi-Low-Frequency-Antenne statt. Basierend auf dieser Messung ließ sich eine mittlere Geschwindigkeit der Radarwellen von 0,07 m/ns ermitteln. Eine Berücksichtigung dieses Faktors bei der Zeit-Tiefen-Umrechnung ergab eine Eindringtiefe von 5,25 m. Damit reichen die Radargramme in den gesättigten Bereich des Untergrundes hinein.

Die Prozessierung der Daten erfolgte mit dem Programm REFLEX (Sandmeier Scientific Software) zunächst interaktiv und anschließend für alle Profile gleich unter Verwendung identischer Filter-Einstellungen (bandpassfrequency, average xy-filter, background removal und energy decay).

Die Visualisierung und Interpretation des Datensatzes erfolgte schließlich mit der Software GOCAD®.

4.3. Ermittlung von Durchlässigkeitsbeiwerten

Für die Ermittlung von Durchlässigkeitsbeiwerten gibt es verschiedene Herangehensweisen. Für dieses Projekt wurden Siebanalysen und Schlämmanalysen (Kapitel 4.3.1) sowie Pumpversuche (Kapitel 4.3.2) durchgeführt. Da diese Untersuchungen aber nur auf dem Testfeld und in dessen näherer Umgebung durchgeführt werden konnten, wurde zusätzlich ein deterministisches Verfahren zur Abschätzung des Durchlässigkeitsbeiwertes aus petrographischen Bohrgutbeschreibungen (Kapitel 4.3.3) eingesetzt.

4.3.1. Sieb- und Schlämmanalysen

Die Sieb- und Schlämmanalysen zu den Sedimentproben des Testfeldes und den Rückstellproben einer zeitnahen Bohrkampagne des Zweckverbandes Gruppenwasserwerk Dieburg wurden nach DIN 18123 und DIN 66165 durchgeführt. Mit der Software GGU-SIEVE (Civilserve GmbH) erfolgte anschließend die Auswertung der Laborergebnisse. Für jede bearbeitete Probe wurde eine schichtbezogene Kornsummenkurve erstellt. Anhand dieser Korngrößenverteilungen konnten die hydraulischen Leitfähigkeiten für die Sedimentproben berechnet werden. Nach den Berechnungsmethoden von Hazen (1893) und Beyer (1964) zeichnen sich die hier analysierten Sedimentproben durch teilweise hohe Ungleichförmigkeitswerte (U) aus, sodass die Gültigkeitsbedingungen beider Berechnungsmethoden (Hazen 1893: $U < 5$, Beyer 1964: $1 < U < 20$) oft verletzt werden. Bei hohen Ungleichförmigkeitswerten unterschätzen die Formeln von Beyer (1964) und Hazen (1893) die hydraulische Leitfähigkeit deutlich (Diem et al. 2010). Aus diesem Grund kam alternativ die überschlägige Formel nach Białas und Kleczkowski (1970) zum Einsatz, bei welcher der maßgebliche Parameter der Korngrößendurchmesser bei 20 % Siebdurchgang liegt (Lewin et al. 2014).

4.3.2. Pumpversuche

In den 1"-Messstellen erfolgten zunächst konventionelle Pumpversuche mit konstanten und pulsationsfreien Förderraten bis zu 21,8 l/min (Durchschnitt: 15 l/min). Die kontinuierliche Aufzeichnung der Grundwasserspiegellagen während der Pumpversuche erfolgte mit einer Drucksonde (KELLER AG; DCX-16).

Anschließend wurden in den 1"-Messstellen unter Einsatz eines Packersystems tiefenorientierte Multilevel-Pumpversuche mit Pumpraten von 1,4 l/min durchgeführt. Das bereits bei früheren Arbeiten eingesetzte (Trauth 2008 und Kluth 2009) Scheibenpackersystem besteht aus Kunststoff- und Silikonscheiben, welche auf eine Gewindestange gesteckt und mit Muttern fixiert werden. Während eines Pumpversuches wurde das Wasser aus jeweils einem bestimmten Messintervall gefördert, das zwei Packer mit einem Abstand von 80 cm zueinander nach oben und unten begrenzen. Im Messintervall befand sich eine Drucksonde (KELLER AG; DCX-16), die kontinuierlich die in diesem Intervall erzielte Druckhöhenänderung aufzeichnete. Durch aufeinander schraubbare Gewindestangen konnte das Packersystem in beliebigen Tiefen innerhalb des Pumpbrunnens platziert werden. Im Gegensatz zum normalen Pumpversuch konnte beim Multilevel-Pumpversuch kein 16 mm-Steigrohr zum Einsatz kommen. Das Packersystem ließ hier nur einen Ansaugschlauch mit 6 mm Innendurchmesser zu.

Die Multilevel-Pumpversuche wurden mit dem Programm AQTESOLV (HydroSOLVE, Inc.) nach den Verfahren von Neumann (1974) und Theis (1935) für den ungespannten Aquifer mit partial penetration ausgewertet. Hierzu wurden die vollverfilterten Messstellen im jeweils vom Packersystem begrenzten Bereich als teilverfiltert angenommen.

Vom 9. Juli 2011 6:00 Uhr bis zum 10. Juli 2011 18:00 Uhr erfolgte zusätzlich ein Pumpversuch im Brunnen B16 mit einer durchschnittlichen Förderrate von $113,64 \text{ m}^3/\text{s}$, um einen regionalen Durchlässigkeitsbeiwert zu ermitteln. Die Messstellen GWM_E, T2B und T1B dienten als Beobachtungsrohre. Das Messintervall aller beteiligten Datenlogger wurde von 15 Minuten auf 1 Minute umgestellt und die Zeit, gemäß dem Signal der Atomuhr der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt synchronisiert. Der Pumpversuch wurde ebenfalls mit dem Programm AQTESOLV nach dem Verfahren von Theis (1935) ausgewertet. Dabei wurde die Aquifermächtigkeit mit $34,5 \text{ m}$ angenommen und die Filterstrecke des Brunnens zu einem $16,5 \text{ m}$ großen Abschnitt zusammengefasst, der Brunnenradius ging mit den Werten $0,4 \text{ m}$ (innen) und $1,3 \text{ m}$ (außen) in die Berechnungen ein.

4.3.3. Abschätzung aus Bohrgutbeschreibungen

Mit Siebanalysen und Pumpversuchen konnten Durchlässigkeitsbeiwerte für das Testfeld und dessen nähere Umgebung bestimmt werden. Für das übrige Gebiet des Detailmodells liegen petrographische Schichtbeschreibungen von Bohrungen aus dem Schichtenverzeichnis der Bohrdatenbank des Hessischen Landesamtes für Naturschutz, Umwelt und Geologie vor. Um auch diese Informationen für die Parametrisierung des Detailmodells nutzen zu können, wurde die Software GCI-PetroKf (GCI GmbH) verwendet.

Diese Software bietet ein deterministisches Verfahren zur zuverlässigen Abschätzung des Durchlässigkeitsbeiwertes aus petrographischen Schichtbeschreibungen an (Fuchs 2010). Das Verfahren basiert auf der Ableitung einer synthetischen Kornsummenkurve aus der petrographischen Bohrgutbeschreibung. Aus dieser synthetischen Kornsummenkurve werden die für die Durchlässigkeitsbeiwert-Berechnung erforderlichen Parameter ermittelt.

Aus den petrographischen Bohrgutbeschreibungen in den Schichtenverzeichnissen der Bohrdatenbank wurden mittels der Software GCI-PetroKf Durchlässigkeitsbeiwerte nach Hazen (1893), Beyer (1964) sowie Białas und Kleczkowski (1970) ermittelt.

Insgesamt konnten 900 petrographische Bohrgutbeschreibungen in die Software importiert werden. Für 808 erkannte petrographische Bohrgutbeschreibungen wurden Durchlässigkeitsbeiwerte nach Białas und Kleczkowski (1970) innerhalb der entsprechenden Gültigkeitsregeln ermittelt.

4.3.4. Vergleich der Methoden

Entsprechend der durchgeführten Analysen und Berechnungen standen Durchlässigkeitsbeiwerte zur Verfügung, die mittels Siebanalysen, lokalen Pumpversuchen, einem regionalen Pumpversuch und petrographischen Bohrgutbeschreibungen ermittelt wurden.

Der Einsatz dieser verschiedenen Methoden erfolgte standortabhängig. So fanden lokale Pumpversuche und Siebanalysen im Bereich des Testfeldes statt (Abb. 3 und Abb. 6), zusätzliche Siebanalysen erfolgten für Rückstellproben neuerer Bohrungen in der Nähe des Baggersees (Abb. 14), der regionale Pumpversuch wurde im Brunnen B16 durchgeführt und bis zum Testfeld beobachtet (Abb. 3 und Abb. 6), die Ermittlung von Durchlässigkeitsbeiwerten über petrographische Bohrgutbeschreibungen schließlich kam bei allen Bohrungen der Datenbank des Hessischen Landesamtes für Naturschutz, Umwelt und Geologie zum Einsatz, die einen entsprechenden Eintrag aufwiesen (Abb. 4).

Die Ergebnisse der verwendeten Methoden wurden miteinander verglichen, um deren jeweilige Vor- und Nachteile herauszuarbeiten. Auf dieser Grundlage konnte eine Daten-Wichtung nach Methode einerseits sowie Menge und räumlicher Verteilung andererseits vorgenommen werden.

4.4. Gewinnung hydraulischer Daten

4.4.1. Zeitreihen des Grundwasserspiegels

Zur Messung und Aufzeichnung des See- und Grundwasserspiegels wurden digitale Datenlogger (KELLER AG; DCX-16 und DCX-22 AA) mit einer Taktfrequenz von 15 Minuten im See (SWM), in den Grundwassermessstellen (T1B, T2B, 50159 und 50180) sowie im Brunnen B16 installiert. Während des Markierversuches (siehe Kapitel 4.4.4) speicherten zusätzliche digitale Datenlogger in Grundwassermessstellen (50041, 50042, 50065, 50066, 50070 und 50167) den regionalen Grundwasserspiegel ebenfalls mit einer Taktfrequenz von 15 Minuten auf. Die so gewonnenen Daten dienten im instationären Grundwasserströmungsmodell als Eingangsdaten.

Um einen Einfluss von Luftdruckschwankungen auf die die Grundwasserspiegelmessungen ausschließen zu können, erfolgten die Messungen mehrheitlich mit Absolutdrucksensoren. In einigen Grundwassermessstellen kamen Relativdrucksensoren zum Einsatz. Die von diesen Drucksensoren aufgezeichneten Daten konnten manuell mittels Luftdruckdaten korrigiert werden.

Die Lage der verwendeten Messstellen kann Abb. 3, Abb. 6 und Abb. 14 entnommen werden. Vor dem Neubau der Doppel-Grundwassermessstelle 50180/50181 wurde die in unmittelbarer Nähe befindliche Grundwassermessstelle GWM_E für die Aufzeichnung des Grundwasserspiegels verwendet (siehe Kapitel 5.2.2). Aufgrund der Nähe dieser drei Messstellen zueinander taucht in den Abbildungen nur die Grundwassermessstelle 50180 auf.

4.4.2. Zeitreihen der Grundwasserentnahme

Der Pumpbetrieb in den Brunnen B15, Brunnen B16 und Brunnen B17 erfolgt teilweise kontinuierlich und teilweise nach Bedarf. „Kontinuierlich“ bedeutet hierbei, dass der Brunnen für eine längere Zeit mit annähernd gleicher Förderrate in Betrieb ist. Im Normalfall ist ein Brunnen eine Woche in Betrieb und anschließend eine Woche nicht in Betrieb. „Nach Bedarf“ bedeutet, bei einer hohen Gesamtförderung des Zweckverbandes Gruppenwasserwerke Dieburg kann ein Brunnen – auch über mehrere Monate – in Betrieb sein, während bei geringerer Gesamtförderung der Brunnen nicht in Betrieb ist. Die Brunnenfördermengen wurden vom Zweckverband Gruppenwasserwerk Dieburg in einer Taktfrequenz von 5 Minuten zur Verfügung gestellt.

Die Lage von Brunnen B15, Brunnen B16 und Brunnen B17 ist Abb. 3 und Abb. 14 zu entnehmen. Brunnen B17 liegt dabei in unmittelbarer Nähe zur Grundwassermessstelle 50168, jedoch außerhalb des Modellgebietes.

4.4.3. Zeitreihen der Grundwassertemperatur

Die Aufzeichnung der Grundwassertemperatur erfolgte kontinuierlich, tiefenorientiert und hochaufgelöst (TITEC Temperaturmesstechnik GmbH; Resistance Temperature Detector). Eine zusätzliche Kalibrierung der Sensoren in Eiswasser reduzierte den Systemmessfehler auf $\pm 0,0115$ °C (Drefke 2010). Die Temperaturzeitreihen wurden mit einer Taktfrequenz von 15 Minuten in Datenloggern (Madvetech, Inc.) gespeichert.

Die Datenlogger befanden sich in wasserdichten Kunststoff-Boxen unter der Erdoberfläche, um die Geräte vor äußeren Einflüssen wie Sonnenlicht, Sturm, Regen und Tieren zu schützen. Die Kabelbündel befanden sich ohne Packersystem innerhalb der Filterrohre. Ein Packersystem erschien im Hinblick auf die Studie von Trauth (2008), in welcher kein Unterschied zwischen den Messwerten mit Packersystem und den Messwerten ohne Packersystem auftrat, verzichtbar.

Die Ausstattung mit automatischen Datenloggern zur kontinuierlichen Überwachung der Grundwassertemperatur in hoher Auflösung erfolgte für vier Grundwassermessstellen (siehe Abb. 6). Zwei Messstellen (K1 und T2A) wiesen acht Temperaturkanäle und zwei Messstellen (T1A und F3) vier Temperaturkanäle auf. Die Temperaturkanäle (TK) befanden sich in den Messstellen in gleichen Tiefenpositionen (117,5 | 116,9 | 116,4 | 114,9 | 113,8 | 112,9 | 111,9 und 110,9 m über NN), um die Grundwassertemperaturen später miteinander vergleichen zu können. Die Tiefenpositionen der verschiedenen Temperaturkanäle orientieren sich an den Resultaten der schichtbezogenen Sieb- und Schlämmanalysen der Grundwassermessstelle K1. Die Installation der Temperatursensoren erfolgte in Schichten mit hohen Durchlässigkeitsbeiwerten sowie in den angrenzenden Schichten mit niedrigen Durchlässigkeitsbeiwerten.

Im Baggersee wurde ein automatischer Datenlogger mit acht Temperaturkanälen eingebaut. Die Tiefenpositionen entsprachen denen der Grundwassermessstellen. Die beschwereten Kabel mit den Temperatursensoren lagen entlang des Seegrundes mit einer Befestigung der Anordnung am Ufer.

Die gemessenen hochaufgelösten Multilevel-Temperaturdaten des Seewassers wurden mit denen des Grundwassers in den Messstellen K1 (5 m vom See entfernt) und T2A (55 m vom See entfernt) verglichen. Um Unterschiede visualisieren und analysieren zu können, wurden vertikale Temperaturprofile und Temperaturzeitreihen erstellt.

Jeweils eine einzelne Temperaturkurve in einem vertikalen Temperaturprofil ist das Ergebnis einer direkten Interpolation zwischen den benachbarten Temperaturkanälen einer Messstelle zu einer bestimmten Zeit von TK1 über TK2, TK3, TK4, TK5, TK6 und TK7 bis zu TK8. Diese vertikalen Temperaturprofile wurden über den Zeitraum von einem Jahr entwickelt und in Diagrammen dargestellt.

Temperaturzeitreihen wurden für das Seewasser sowie die Grundwassermessstellen K1 und T2A in vier verschiedenen Tiefen erstellt (TK2-116,9, TK4-114,9, TK6-112,9 und TK8-110,9 m über NN). Stündliche Temperaturdaten wurden verwendet, um die minimalen und die maximalen Temperaturen des Jahres mittels polynomialer Regression zu ermitteln. Die Temperaturkurven wurden mit der Lufttemperatur vertikal verglichen (alle Tiefen einer Messstelle) anhand der Zeitverschiebung des Temperaturmaximums im Sommer 2011. Die Temperaturkurven wurden mit der Seetemperatur horizontal verglichen (eine Tiefe in allen Messstellen) anhand der Zeitverschiebung des Temperaturminimums im Winter 2011.

4.4.4. Markierversuch

Um Informationen über den Fließweg und die Fließgeschwindigkeit zwischen dem Testfeld und dem Brunnen B16 zu erhalten, wurde ein Markierversuch mit Uranin und Eosin durchgeführt, bei dem die Grundwassermessstelle T2A als Eingabestelle fungierte, während die Grundwassermessstelle 50180 und der Brunnen B16 als Beobachtungsstellen dienten. Um den Markierversuch so gut wie möglich durchführen zu können, sollten stationäre Bedingungen vorliegen. Zu diesem Zweck förderten die Brunnen B16 und B15 kontinuierlich auf Maximalleistung, während der Brunnen B17 nicht in Betrieb war. Dem entsprechend sollte das hydraulische Gefälle im Testfeld in Richtung Brunnen B16 geneigt sein. Die zur Überprüfung durchgeführten Grundwasserspiegelmessungen zeigten eine entsprechende Differenz von 6,6 cm zwischen den Grundwassermessstellen T1A und der T2A.

Für die Eingabe des Markierstoffes in die Grundwassermessstelle T2A wurde eine Vorrichtung entwickelt, die sich aus verschraubten Gewindestangen zusammensetzt, an welchen mehrere Packer tiefenbezogen befestigt sind. Die Packer dichten einen unteren Eingabebereich zwischen 110 m und 112 m über NN sowie einen oberen Eingabebereich zwischen 115 m und 117 m über NN ab. Innerhalb dieser beiden Bereiche endet jeweils ein durch die Packer geführter Silikonschlauch.

Die Berechnung der Eingabemenge für Uranin erfolgte nach dem Fächer-Quadrat-Ansatz (Leibundgut 1982 zitiert nach Käss 1992):

$$m = \tan \alpha/2 \cdot H \cdot s \cdot (2 \cdot x \cdot c_{\max} + AM \cdot (2 \cdot x - s))$$

m	Einspeisemenge [mg]
α	Öffnungswinkel der Tracerwolke (i.a. $\approx 30^\circ$)
H	Aquifermächtigkeit [m]
s	Abstand, ab dem sich ein paralleler Strömungskörper einstellt [m]
x	Abstand zwischen Einspeise- und Entnahmestelle [m]
c_{\max}	maximale Tracerkonzentration [mg/m ³]
AM	adsorbierte Tracermenge [mg/m ³]

Zur Berechnung der Eingabemenge wurden folgende Annahmen getroffen: Es wird keine Tracermenge adsorbiert, der Öffnungswinkel ist 30° , die Aquifermächtigkeit (markierter Bereich) beträgt 2 m, die Fächerlänge ist variabel, der Abstand von der Eingabestelle zur Entnahmestelle ist 365 m und die maximale Tracerkonzentration im Brunnen B16 darf 1 mg/m³ nicht überschreiten.

Tritt das markierte Wasser in den Brunnen ein, wird es verdünnt. Um die Verdünnung im Brunnen B16 abzuschätzen, wurde angenommen, dass nur 1/8 des radialen Zustroms berücksichtigt wird. Außerdem gibt es insgesamt 16,5 m Filterstrecken im Brunnen B16, aber nur 2 m markierten Aquifer. Bei einer durchschnittlichen maximalen Förderleistung von 113,6 m³/h und einer angenommenen Fächerlänge zwischen 50 m und 100 m errechnet sich eine Einspeisemenge von 1291 g bis 2582 g. Basierend auf den vorangegangenen Berechnungen und Annahmen wurde eine Eingabemenge von 2 kg für Uranin festgelegt.

Für Eosin ist keine separate Berechnungsformel bekannt. Es werden gelegentlich Korrekturfaktoren (Schudel et al. 2002) oder Beiwerte (Käss 1992) zu den Uranin-Formeln angegeben. Gemäß diesen Faktoren wurde eine Eingabemenge von 2,5 kg Eosin festgelegt.

4.5. Geologisches Basismodell

Für die Erstellung des geologischen 3D-Schichtenmodells des Raums Babenhausen wurde die Software GOCAD® (PARADIGM®, Version 2009.3) verwendet. GOCAD® basiert auf dem Interpolationsalgorithmus Discrete Smooth Interpolation (DSI) von Mallet (1989) und ermöglicht die Entwicklung komplexer Modelle, basierend auf heterogene Eingangsdaten. Der Arbeitsablauf der Modellierung orientierte sich an den Modellierungsrichtlinien von Caumon et al. (2009) sowie Kaufmann und Martin (2008) und erfolgte schlussendlich in vier Arbeitsschritten (Abb. 7) nach Spottke et al. (2005):

- a) Umwandlung verschiedener Eingangsdaten in ein GOCAD®-konformes Datenformat und anschließender Import in die Modellierungssoftware:
 - (1) Formatierung der Bohrdaten in einer Datenbank und Import der Daten
 - (2) Editierung geologischer Schnitte, Import als Bild-Datei, georeferenzieren und digitalisieren der Schichtgrenzen
 - (3) Import geologischer Karten nach Lang (2007): Basishöhen der Schichten als Linien
- b) Konstruktion von Störungen und Horizonten:
 - (1) Konstruktion der Horizonte anhand geologischer Karten und Schnitte sowie Bohrdaten.
 - (2) Konstruktion der Störungen anhand geologischer Karten und Schnitte sowie Bohrdaten.
- c) Definition der Kontakte zwischen Horizonten und Störungen sowie Interpolation unter Berücksichtigung dieser Kontakte und der definierten Geometrien.
- d) Entwicklung eines volumetrischen 3D-Modells anhand der modellierten Horizonte und Störungen.

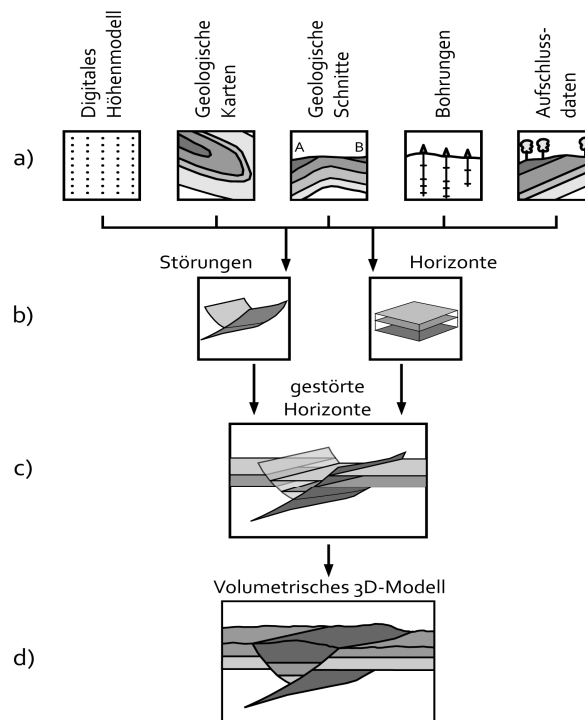


Abb. 7: Schematische Darstellung der Arbeitsschritte bei der Geomodellierung (Spottke et al. 2005, verändert; a) Eingangsdaten, b) Modellierung der Flächen, c) Modellierung der gestörten Horizonte, d) Konstruktion des volumetrischen 3D-Modells)

Basierend auf dem geologischen 3D-Modell der Hanau-Seligenstädter Senke (Lang 2007) sowie den neueren geologischen Karten und Schnitten von Lang (2007) wurde für den Raum Babenhausen ein 12 km x 10 km großes geologisches 3D-Modell entwickelt und mit vorhandenen Bohrdaten abgeglichen. Um Randeffekte ausschließen zu können, wurde die Größe des Basismodells in Bezug auf seine Rechts- und Hochwerte so gewählt, dass sowohl der lokale Quarzsand- und Kiestagebau als auch der Brunnen B16 des Zweckverbandes Gruppenwasserwerk Dieburg in einiger Entfernung vom Modellrand liegen: Rechtswerte von ³⁴94000 bis ³⁵06000 und Hochwerte von ⁵⁵30000 bis ⁵⁵40000. Das Basismodell umfasst die stratigraphischen Haupttrennflächen Basis T6-T7-Terrasse, Basis T1-T5-Terrasse, Basis Pliozän und Basis Oligozän (siehe Abb. 4).

4.6. Geologisches Detailmodell

Das Detailmodell befindet sich im zentralen Bereich des Basismodells, östlich von Babenhausen und erstreckt sich über eine Fläche von 2500 m x 2850 m (Abb. 4). Es bildet die Grundlage für das Grundwasserströmungsmodell (siehe Kapitel 5.6).

Beim Detailmodell handelt es sich um ein 3-dimensionales Grid, dessen geometrischer Aufbau auf den modellierten Schichtflächen des Basismodells beruht (siehe Kapitel 5.1). Das Grid wurde mit den ermittelten Durchlässigkeitsbeiwerten (Kapitel 5.3.5) attribuiert.

4.6.1. Erstellung des Volumen-Grids

Die Erstellung des Volumen-Grids erfolgte mit der Software SKUA-GOCAD™ (PARADIGM®; Version 14.1). In dieser Software bieten die Workflows „Structure & Stratigraphy“ und „Flow Simulation Grid“ die Möglichkeit, den geologischen Datensatz bestmöglich auf den Transfer zur Grundwassermodellierungssoftware vorzubereiten.

Im Gegensatz zu GOCAD® setzt die Verwendung des Workflows „Structure & Stratigraphy“ von SKUA-GOCAD™ die Angabe und Einbeziehung eines stratigraphischen Modells sowie eine Zuweisung von Erosionscharakteristiken voraus. Dies erforderte die Basisflächen des Basismodells (Erdoberfläche, Basis T6-T7-Terrasse, Basis T1-T5-Terrasse, Basis Pliozän und Basis Oligozän) für das Detailmodell in Top-Flächen umzuwandeln und geologisch miteinander in Beziehung zu setzen (Abb. 8). So entsteht zum Beispiel der Detailmodell-Horizont Top Pliozän aus den Punktdaten des Basismodell-Horizontes Basis T1-T5-Terrasse und den Verbreitungsrandern der Basis Pliozän (Abb. 8 A und 8 B). In den Bereichen, in denen gemäß Verbreitungslinien keine pliozäne Einheit auftritt, wurden die Punktdaten der Basis T1-T5-Terrasse entfernt (Abb. 8 C und 8 D). Nach der Umsetzung dieser Arbeitsschritte für jeden Horizont, ergibt sich ein aus vier Horizonten (Top T6-T7-Terrasse, Top T1-T5-Terrasse, Top Pliozän und Top prä-paläogene Gesteine) bestehendes Modell (Abb. 9), welches die Basis für die Konstruktion des Flow Simulation Grids im gleichnamigen Workflow bildet.

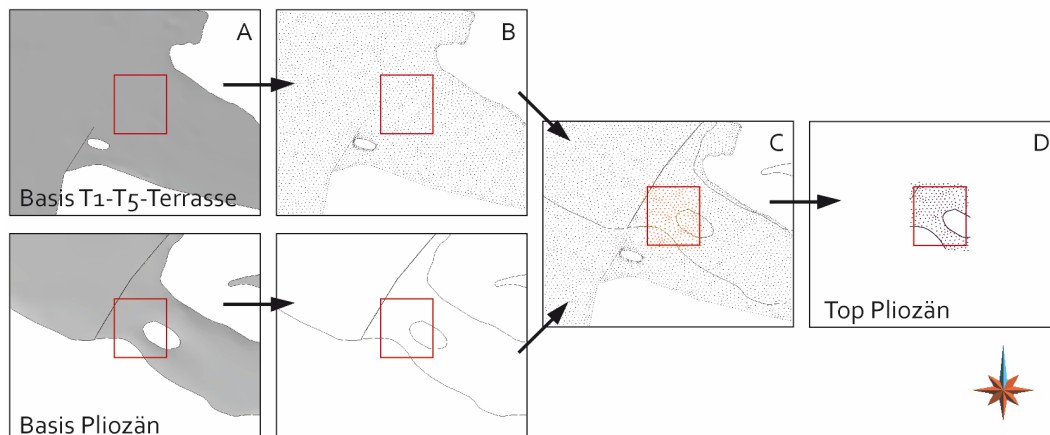


Abb. 8: Umwandlung der Basis-Horizonte des Basismodells in Top-Horizonte des Detailmodells am Beispiel des Detailmodell-Horizontes Top Pliozän (Erläuterungen im Text)

Beim Flow Simulation Grid handelt es sich um ein stratigraphisches Gitter (SGrid), das mit vielen Strömungs-Simulatoren kompatibel ist. Die Zellflächen des Grids werden so orthogonal wie möglich zueinander gehalten und die Zelleigenschaften im Zentrum jeder Zelle abgelegt (Paradigm 2014: SKUA-GOCAD™ User Guide, Part VIII: Grid Building).

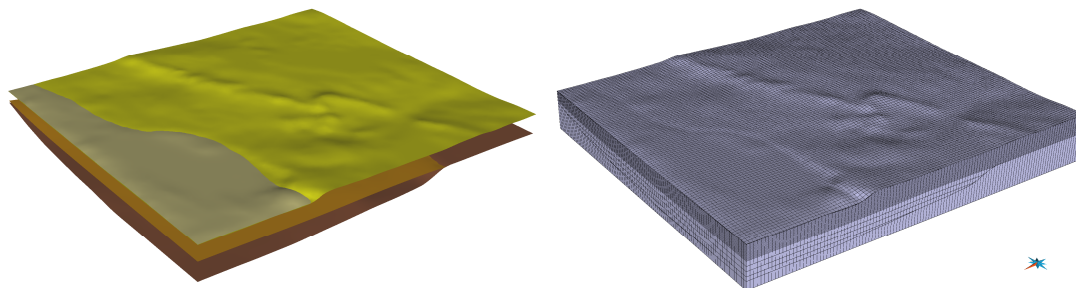


Abb. 9: Umwandlung des Structural Model in ein Flow Simulation Grid

Die horizontale Diskretisierung des Flow Simulation Grids richtete sich sowohl nach der für die spätere Parametrisierung zur Verfügung stehenden Datenmenge als auch nach der Rechenleistung des Computers, welche für die Realisierbarkeit der gewählten Zell-Auflösung im instationären Grundwasserströmungsmodell entscheidend ist. In diesem Rahmen wurde eine horizontale Zellauflösung von 100 x 114 Zellen festgelegt, was einer Zellgröße von 25 m x 25 m entspricht (Abb. 9).

Die vertikale Diskretisierung richtete sich nach der Datendichte der Durchlässigkeitsbeiwerte über die Tiefe. Um diese Datendichte visualisieren zu können, wurden die vorhandenen Durchlässigkeitsbeiwerte ihren Schichtmitten zugeordnet und anschließend in 2 m-

Klassen über die Tiefe eingeordnet (Abb. 10). Es fällt auf, dass im Tiefenbereich 100 m bis 130 m über NN die meisten Daten vorhanden sind (Top Pliozän liegt bei circa 100 m über NN). Dementsprechend wird dem Modell-Layer T6-T7-Terrasse eine Zelle, dem Modell-Layer Pliozän fünf Zellen und dem Modell-Layer prä-paläogene Gesteine eine Zelle zugewiesen. Der vertikale Bereich des Modell-Layers T1-T5-Terrasse wird hingegen in 30 Zellen aufgeteilt, sodass eine Zelle annähernd 1,4 m mächtig ist. Das gesamte Modell weist 421800 Zellen auf.

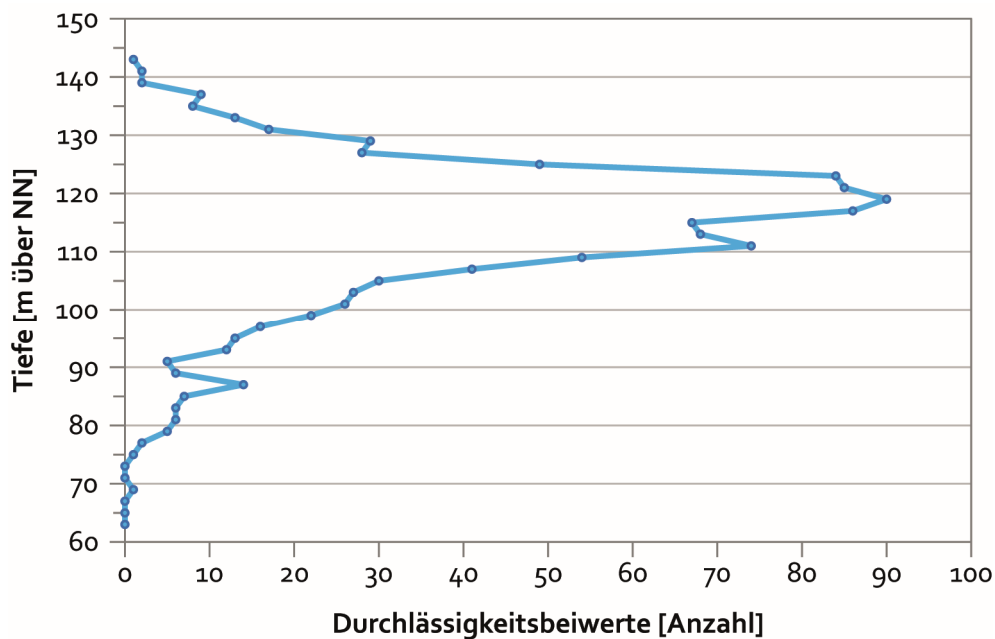


Abb. 10: Verteilung der Durchlässigkeitsbeiwerte über die Tiefe in 2 m-Klassen (Werte sind jeweils der Klassenmitte zugeordnet; Lage Top Pliozän bei ca. 100 m über NN)

4.6.2. Übertragung von Durchlässigkeitsbeiwerten in den Raum

Gesteinseigenschaften variieren im 3-dimensionalen Raum. Im Falle von heterogenen fluvi-
alen Sedimenten kann die Variation von Durchlässigkeitsbeiwerten mehrere Zehnerpoten-
zen betragen.

Für die Übertragung von Durchlässigkeitsbeiwerten in den Raum standen Durchlässigkeits-
beiwerte aus Pumpversuchen im Testfeld, aus einem Pumpversuch im Brunnen B16, aus
Sieb- und Schlämmanalysen sowie aus petrographischen Bohrgutbeschreibungen zur Ver-
fügung. Diese Daten galt es sowohl horizontal als auch vertikal zu extrapolieren.

Für die vertikale Extrapolation war zunächst eine Parallelisierung der Durchlässigkeitsbei-
werte, gewonnen aus Sieb- und Schlämmanalysen (Daten bis 10 m Tiefe), mit denen der

Multilevel-Pumpversuche (Daten bis 20 m Tiefe) des Testfeldes vorgesehen. Basierend auf dem Ergebnis der Parallelisierung und den Multilevel-Pumpversuchen sollte eine Extrapolation der Daten in die Tiefe erfolgen. Aufgrund eines unzureichenden Vergleichsergebnisses (siehe Kapitel 5.3.4.2) musste aber von dieser vertikalen Art der Extrapolation abgesehen werden. Die räumliche Verteilung der Durchlässigkeitsbeiwerte erfolgte daher per Interpolation. Für diese Interpolation wurde zunächst ein Datensatz an Durchlässigkeitsbeiwerten zusammengestellt.

Jede verwendete Methode zur Gewinnung von Durchlässigkeitsbeiwerten allein würde auf Grund der geringen Datenmenge und der ungünstigen Datenverteilung nicht zu einem sinnvollen Ergebnis führen: so liegen Sieb- und Schlämmanalysen für das Testfeld und für das südliche Seeufer vor; Pumpversuche fanden auf dem Testfeld und im Brunnen B16 statt. Petrographische Schichtbeschreibungen lagen dagegen für 756 Schichten der 81 Bohrungen des Detailmodellgebietes vor. Deswegen wurde darauf verzichtet, für jede Methode ein separates Modell mit Durchlässigkeitsbeiwerten zu interpolieren.

Der zusammengestellte Datensatz besteht im Wesentlichen aus den Werten der petrographischen Bohrgutbeschreibung. Liegen für eine Bohrung Ergebnisse von Sieb- und Schlämmanalysen vor, werden diese als sicherer eingestuft und ersetzen an dieser Stelle die Werte aus der petrographischen Bohrgutbeschreibung. In Gebieten mit sehr geringer Datendichte wird schließlich der Durchlässigkeitsbeiwert eingesetzt, der im Rahmen des Pumpversuches im Brunnen B16 ermittelt werden konnte.

Um die Durchlässigkeitsbeiwerte per Interpolation im Raum zu verteilen, stand eine Interpolation in FEFLOW oder eine Interpolation in SKUA-GOCAD™ zur Auswahl. Die Interpolation der Durchlässigkeitsbeiwerte im Detailmodell mit SKUA-GOCAD™ berücksichtigt ein größeres Gebiet als das Grundwasserströmungsmodell. Das ist aufgrund der Datenverteilung von Vorteil, da so die Modellabschnitte mit geringer Datendichte zusätzliche Informationen erhalten. Ferner erfolgt die Interpolation in SKUA-GOCAD™ für jede geologische Einheit separat und umfasst mehrere Zell-Schichten. Im Gegensatz dazu werden Interpolationen in FEFLOW pro Layer durchgeführt und Informationen außerhalb des Modells in Modellrandnähe können nicht berücksichtigt werden. Ein weiterer Vorteil von SKUA-GOCAD™ liegt in der Funktion „Apply Skript“: Sollte der Interpolationsalgorithmus zu kleine oder zu große Werte ermitteln, können diese im 3-dimensionalen Raum erfasst und durch einen sinnvollen Maximal-/Minimalwert ersetzt werden. Insofern erwies sich die Interpolation in SKUA-GOCAD™ als vorteilhafter gegenüber der in FEFLOW. Sie bildet die Basis für die Modellvarianten der Sensitivitätsanalyse im Grundwasserströmungsmodell (siehe Kapitel 4.7.5 und Kapitel 5.6.1).

4.6.3. Export des Detailmodells

Die Geometrie des Detailmodells (Eckpunkte der Zellen) und die im Detailmodell verteilten Eigenschaften (Zentrum der Zellen) wurden zunächst in eine Datenbank (Microsoft®

ACCESS®) überführt, um das für FEFLOW notwendige Dateiformat herzustellen. Die Geometrie-Datensätze und die Eigenschaften-Datensätze wurden anschließend layerweise nach FEFLOW exportiert.

4.7. Grundwasserströmungsmodell

Das Grundwasserströmungsmodell deckt den zentralen Teil des Detailmodellgebietes ab, ist instationär und erstreckt sich über den Zeitraum 1. Januar 2011 bis 24. Juli 2012. Sämtliche geometrischen Strukturen sowie die räumliche Verteilung des Parameters „Durchlässigkeitsbeiwert“ im 3-dimensionalen Grundwasserströmungsmodell entstammen den Berechnungen im Detailmodell. Die Modellierung erfolgte mit der Software FEFLOW in der Version 6.2.6207.

Zu Beginn liegen die Eingangsdaten in geringer zeitlicher Auflösung vor. Dieser Modellabschnitt dient als Einschwingphase. Der ab März 2012 folgende Modellabschnitt basiert auf einer hohen zeitlichen Auflösung. Mit Hilfe dieses Modellabschnittes können die Fließwege im Umfeld des Brunnens B16 dargestellt und analysiert werden (siehe Kapitel 4.7)

4.7.1. Geometrischer Modellaufbau

In FEFLOW wurde zunächst ein 2-dimensionales, horizontales Supermesh definiert. Dabei handelt es sich um eine gleichmäßige Dreiecksstruktur mit frei wählbarer Punktdichte. Um die Grid-Datenpunkte aus SKUA-GOCAD™ bestmöglich einbeziehen zu können, boten sich zwei Varianten an:

- (1) Die X-, Y-Koordinaten der Grid-Datenpunkte werden exakt verwendet und das Supermesh baut auf diesen Datenpunkten auf.
- (2) Das Supermesh baut auf der Datendichte der Grid-Datenpunkte auf, verwendet die X-, Y-Koordinaten der Datenpunkte aber nicht. Das Supermesh wird bestmöglich an die Z-Koordinaten der Datenpunkte angepasst.

Variante 1 ermöglicht die genaue Nachbildung der Zellstruktur des Detailmodells. Dies hat jedoch zur Folge, dass zum einen die Dreiecksvermaschung aus gleichschenkligen Dreiecken besteht und zum anderen die Modellränder viele kleine, spitzwinklige Dreiecke aufweisen, die für komplexe Modellberechnungen ungünstig sind (Mallet 2002). Variante 2 weist eine schöne Dreiecksvermaschung bis in die Randbereiche auf und verwendet damit die X-, Y-Koordinaten der Datenpunkte nicht, während das Supermesh bestmöglich an die Z-Koordinaten der Datenpunkte angepasst wird. Aufgrund der für komplexe Modellberechnungen notwendigen annähernd gleichseitigen Dreiecksvermaschung wurde Variante 2 gewählt. Die Dichte von 3491 Punkten auf 1,918 km² (1820 Punkte/km²) im Supermesh entspricht annähernd dem Eingangsdatensatz mit 11615 Datenpunkten auf einer Fläche von 7,125 km² (1630 Punkte/km²).

Die im Supermesh festgelegte Dreiecksstruktur bildet die Grundlage für die Erweiterung des Grundwasserströmungsmodells in drei Dimensionen. Hierfür wird eine bestimmte Anzahl Slices definiert, deren Dreiecksstruktur dem Supermesh entspricht, weshalb die X- und Y-Koordinaten der einzelnen Nodes identisch sind. Zwei Slices begrenzen einen Layer.

Da dem Grundwasserströmungsmodell das zellbasierte Detailmodell zugrunde liegt, beträgt die vertikale Diskretisierung 37 Layer mit variabler Mächtigkeit.

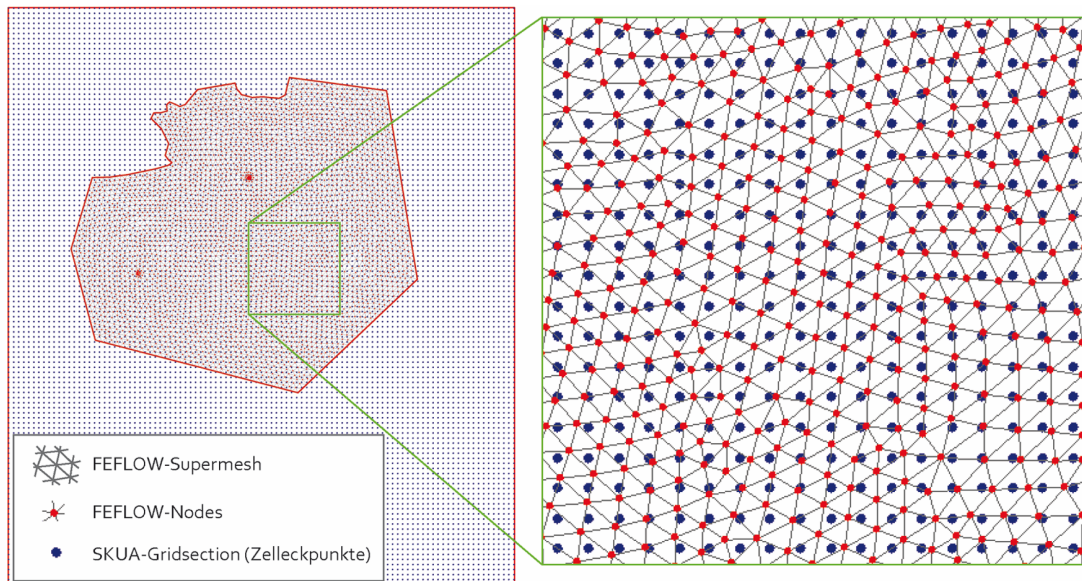


Abb. 11: Regelmäßige Zelleckpunkte einer SKUA-GOCAD™-Gridsection des Detailmodells und FEFLOW-Supermesh mit FEFLOW-Nodes (generierte Dreiecksvermaschung) des Grundwasserströmungsmodells

Der Transfer der Geometriedaten von SKUA-GOCAD™ zu FEFLOW erfolgte über den Export der X-, Y-, Z-Koordinaten der Zelleckpunkte pro Gridsection (Abb. 11) und den Import dieser Punktdatensätze pro FEFLOW-Slice. Dabei ist anzumerken, dass die Zelleckpunkte der vertikal übereinander folgenden Gridsections identische X-, Y-Koordinaten aufweisen. Sie unterscheiden sich lediglich in ihren Z-Koordinaten. Basierend auf den Eingangspunktdatensätzen konnten jedem zunächst horizontalen FEFLOW-Slice die entsprechenden Z-Koordinaten zugewiesen werden. Die Anpassung der Slices an die zugehörigen Z-Koordinaten erfolgte mit der Interpolationsmethode „Inverse Distance“.

Somit umschließen 38 Slices die 37 Layer (Abb. 12). Ein Slice enthält dabei 3491 Nodes und ein Layer 6797 Elements. Das gesamte Modell umfasst somit 132658 Nodes und 251489 Elements.

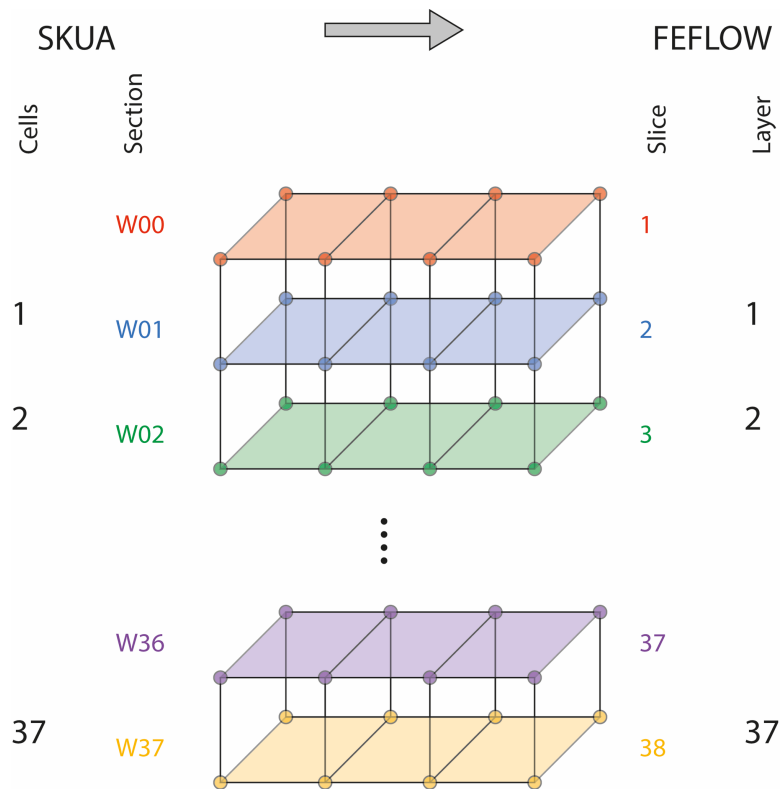


Abb. 12: Transfer der Geometrien von SKUA-GOCAD™ zu FEFLOW durch Export der Zelleckpunkte pro SKUA-GOCAD™-Gridsection und Import der Eingangspunktensätze pro FEFLOW-Slice

Gridsections, die im Detailmodell enden, müssen im FEFLOW-Modell weitergeführt werden (Abb. 13), da das Beenden eines Layers/Slices innerhalb des FEFLOW-Modells nicht zulässig ist (FEFLOW-Manual). Um die gewünschte Kontinuität herzustellen, erfolgte in einer Datenbank die Übertragung der Z-Koordinaten aus der sich im Liegenden befindenden Gridsection in die unvollständige Gridsection. In FEFLOW konnten dann die zunächst identischen Z-Koordinaten um 0,1 m erhöht werden.

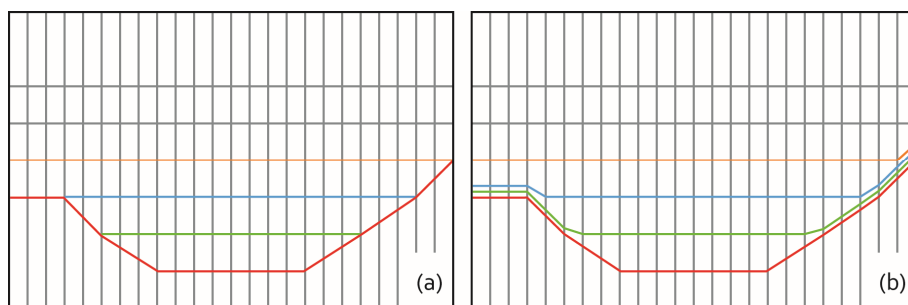


Abb. 13: Vergleich der Struktur des Flow-Modells im SKUA-GOCAD™-Grid (a) mit der Struktur der FEFLOW-Slices (b)

4.7.2. Definition der Modellränder

Das Modellkonzept sieht einen Grundwasserstrom von Südwest nach Nordost vor (Abb. 14). Aufgrund der im Projekt vorangegangenen hydraulischen Untersuchungen wurde für das Grundwasserströmungsmodell von einem ungespannten Grundwasserleiter ausgegangen. Der westliche, südwestliche, südliche, südöstliche, östliche und nordöstliche Modellrand wurde als Randbedingung 1. Art (Festpotential, variabel über die Zeit) definiert.

Dieser Festpotentialrand ergibt sich aus den Grundwassermessstellen 50041, 50070, 50065, 50066 und 50168, welche sich im näheren Umfeld des Brunnens B16 befinden. Der Grundwasserspiegel wurde im ersten Jahr mit monatlichen Werten und im zweiten Jahr mit Stundenwerten in einer Zeitreihe angegeben.

Der Baggersee im Nordwesten und Norden wird als Randbedingung 3. Art (halbdurchlässiger Rand, variabel über die Zeit) berücksichtigt. Um den See als Randbedingung 3. Art zu definieren, erfolgte zum einen die Angabe des Seewasserspiegels über die Zeit (Zeitreihe in Stundenwerten) und zum anderen die Berücksichtigung der Durchlässigkeit des Baggersees über den Leakage-Faktor. Für dessen Berechnung wurde eine Mächtigkeit des Seebodens am steilen Hang von 5 cm angenommen. Der Durchlässigkeitsbeiwert wurde in zwei Varianten verwendet:

A – schlecht durchlässig = $2,53 \cdot 10^{-6}$ m/s

B – gut durchlässig = $2,53 \cdot 10^{-3}$ m/s.

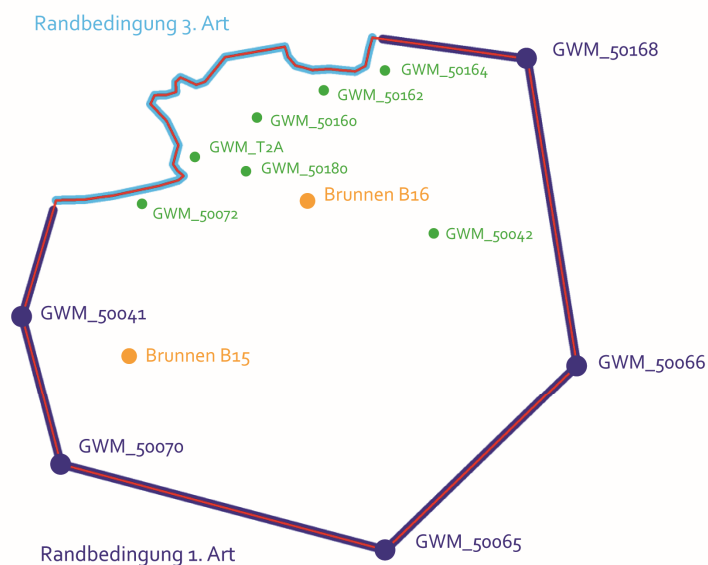


Abb. 14: Schematische Darstellung der Modellränder des Grundwasserströmungsmodells mit den Brunnen und verwendeten Grundwassermessstellen

Die Brunnen wurden als Randbedingung 4. Art im „Multilayer Well“ definiert. Das „Multilayer Well“ ermöglichte eine Berücksichtigung des Brunnenaufbaus (Oberkante obere Filterstrecke und Unterkante untere Filterstrecke). Um den Vollrohr-Abschnitt zwischen oberer und unterer Filterstrecke nachzubilden, wurden die an die Brunnen-Nodes angrenzenden Elemente mit einem Durchlässigkeitsbeiwert von $1 \cdot 10^{-9}$ m/s versehen. Die Brunnenfördermengen wurden in Zeitreihen angegeben. Aufgrund der großen Menge an Originaldaten war eine Reduzierung des Datensatzes erforderlich. Um den Pumpbetrieb trotzdem so gut wie möglich nachbilden zu können, wurden ereignisorientierte Mittelwerte verwendet, was bedeutet, dass jeweils der Mittelwert aller Brunnenfördermengen einer Betriebsphase gebildet wurde (Abb. 15).

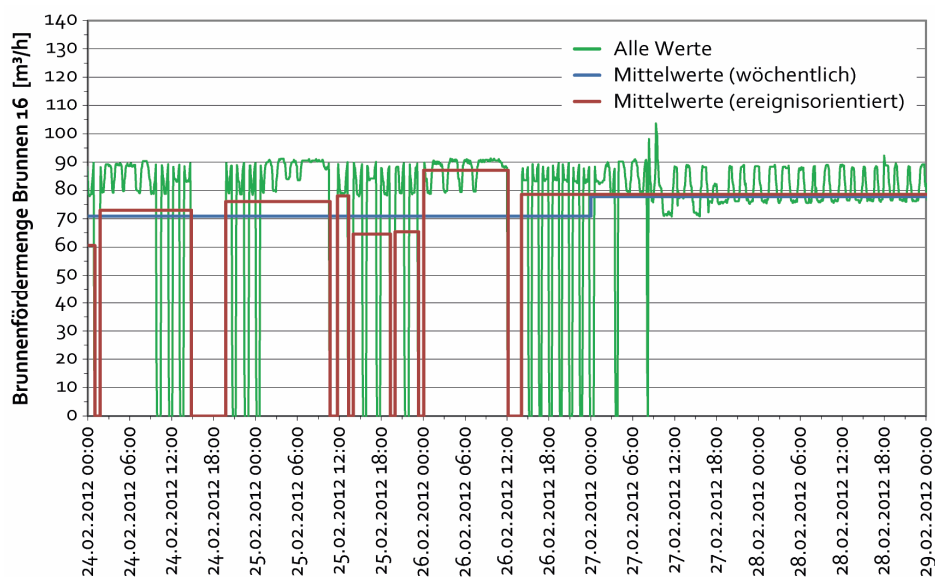


Abb. 15: Beispiel-Ausschnitt der Brunnenfördermengen des Brunnens B16 (original, wöchentliche und ereignisorientierte Mittelwerte)

Die gewählten Modellränder entsprechen damit nur teilweise den von Kinzelbach und Rausch (1995) formulierten zentralen Anforderungen an die Ränder eines Modells:

- Das Interessengebiet sollte möglichst im Zentrum des Modells liegen,
- die Ränder folgen echten hydrogeologischen und hydrologischen Grenzen und
- mit Festpotentialrändern ist sparsam umzugehen.

Im vorliegenden Fall stellt der Einflussbereich des Brunnens B16 das Interessengebiet dar, womit eine Anforderung bestmöglich erfüllt wurde. Die Modellbasis und der halbdurchlässige Rand im Norden des Modells stellen echte hydrogeologische Grenzen dar. Der Festpotentialrand an den übrigen Modellrändern stellt hingegen keine echte hydrogeologische Grenze dar. Im Zustrom und im Abstrom des Interessengebietes liegen mehr als 20 Brunnen

des Zweckverbandes Gruppenwasserwerk Dieburg, deren komplexe, wöchentlich variierenden Schaltphasen aufeinander abgestimmt sind. Eine Berücksichtigung aller Brunnen bis an die Grenzen der Einzugsgebiete würde jedoch das Modellgebiet um ein Vielfaches vergrößern und mit einem unverhältnismäßig hohen Aufwand für die Datenerhebung verbunden sein – bei gleichzeitigem Verlust des angestrebten Detaillierungsgrades im Interessengebiet.

Das erstellte Grundwasserströmungsmodell dient damit explizit nicht zu Prognosezwecken und erlaubt keine Szenarien-Berechnungen im eigentlichen Sinne, auch wenn die Festpotentialränder variabel und hochaufgelöst über die Zeit berücksichtigt wurden.

Das entwickelte Grundwasserströmungsmodell ist somit ausschließlich repräsentativ für den untersuchten Zeitraum. Es kann jedoch für den hier vorausgesetzten Zweck verwendet werden, um die Einflüsse verschiedener Parameter auf die Modellergebnisse, wie zum Beispiel des Parameters „Durchlässigkeitsbeiwert“, umfassend zu untersuchen.

4.7.3. Definition der Durchlässigkeitsbeiwerte

Die Übertragung der Durchlässigkeitsbeiwerte erfolgte analog zur Übertragung der Z-Koordinaten pro Slice (siehe Kapitel 4.7.1). Die beiden Übertragungen unterscheiden sich aber in der räumlichen Lage der Datenpunkte, da die Geometriedaten der Grid-Struktur aus SKUA-GOCAD™ die Zelleckpunkte definieren, während die Eigenschaftsdaten des Grids in SKUA-GOCAD™ zellzentriert abgelegt werden.

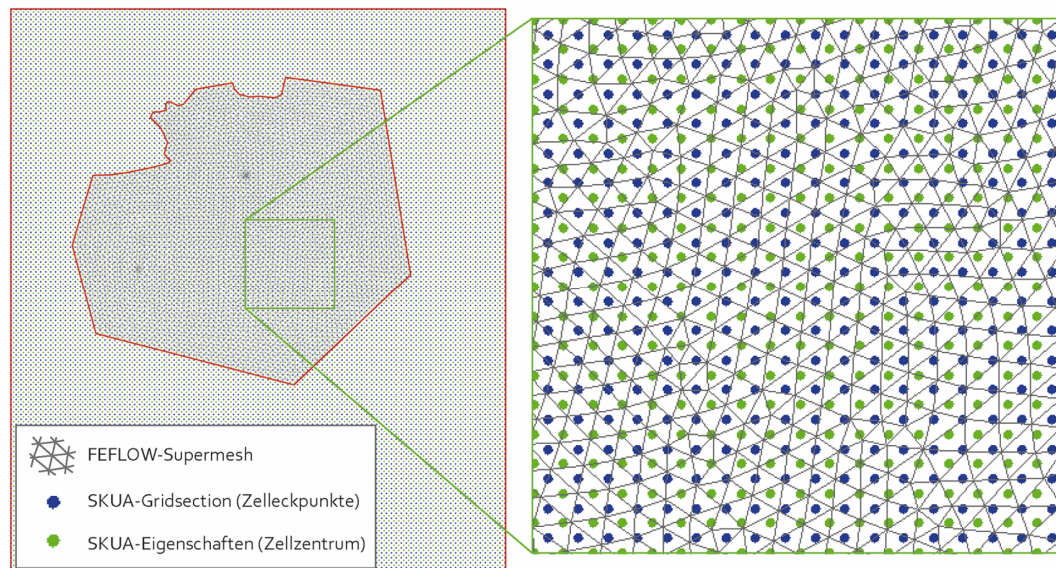


Abb. 16: Regelmäßige Zelleckpunkte einer SKUA-GOCAD™-Gridsection des Detailmodells mit Eigenschaften im Zellzentrum sowie FEFLOW-Supermesh des Grundwasserströmungsmodells

Basierend auf den Eingangspunkt Datensätzen konnten jedem FEFLOW-Layer die entsprechenden Durchlässigkeitsbeiwerte als K_{xx} und K_{yy} zugewiesen werden (Abb. 16). Die Interpolation der Eigenschaftswerte in die zugehörigen Layer-Elemente erfolgte mit der Interpolationsmethode „Inverse Distance“. Für die Definition von K_{zz} wurde ein Anisotropie-Faktor von 10 angenommen.

4.7.4. Definition weiterer Modelleigenschaften

Der spezifische Speicherkoeffizient wurde auf 0,000667 [1/m] festgelegt. Als Porosität wurde 0,32 [-] angenommen (Drefke 2010). Es handelt sich um ein Modell für ungesättigte Strömung (Van Genuchten: $\alpha = 4,1$ [1/m], $n = 1,964$ [-]; nach Literaturwerten in Diersch 2014). Die Grundwasserneubildung floss als Zeitreihe in Tageswerten in das Modell ein. Der berücksichtigte Datensatz basiert auf den täglichen Niederschlagsmengen der Station Schaaheim/Schlierbach des Deutschen Wetterdienstes (zur Verfügung gestellt vom Zweckverband Gruppenwasserwerk Dieburg). Von diesen Daten wurde der Interzeptionsverlust des Freilandniederschlags abgezogen, denn auf Freilandstationen durchgeführte Niederschlagsmessungen charakterisieren nur die Niederschlagsverhältnisse eines vegetationslosen Einzugsgebietes und nicht einer mit Vegetation bestockten Erdoberfläche (Baumgartner und Liebscher 1996). Da das Gebiet des Grundwasserströmungsmodells fast ausschließlich mit Wald (immergrüne Nadelbaumarten, winterkahle Laubbaumarten und Mischwald) bedeckt ist, wurde nach Baumgartner und Liebscher (1996) innerhalb der Vegetationszeit (April – Oktober) ein Interzeptionsverlust von 35 % und außerhalb der Vegetationszeit (November – März) ein Interzeptionsverlust von 25 % angenommen.

4.7.5. Manuelle Sensitivitätsanalyse

Um die Bedeutung des Durchlässigkeitsbeiwertes für das Grundwasserströmungsmodell, speziell für das Fließfeld um den Brunnen B16, untersuchen zu können, wurde eine manuelle Sensitivitätsanalyse bezüglich des Parameters „Durchlässigkeitsbeiwert“ durchgeführt. Dazu wurden insgesamt sechs Grundwasserströmungsmodelle berechnet. So werden zunächst drei Modellvarianten mit unterschiedlicher räumlicher Verteilung der Durchlässigkeitsbeiwerte vorgestellt:

- (1) KF variabel: Modellvariante mit interpolierten Durchlässigkeitsbeiwerten aus dem geologischen Detailmodell
- (2) KF uni: Modellvariante mit einem einheitlichen Durchlässigkeitsbeiwert, bestimmt bei einem regionalen Pumpversuch im Brunnen B16
- (3) KF zonen: Modellvariante mit einer Zonierung von Durchlässigkeitsbeiwerten für jeden Layer des Grundwasserströmungsmodells

Ferner wurde die Verteilung des Parameters „Durchlässigkeitsbeiwert“ entlang des Seerandes des Grundwasserströmungsmodells berücksichtigt, indem in zwei Modellvarianten der Seeboden zum einen als gut durchlässig und zum anderen als schlecht durchlässig angenommen wurde:

(A) Seeboden gut durchlässig: $KF = 2,53 \cdot 10^{-3} \text{ m/s}$

(B) Seeboden schlecht durchlässig: $KF = 2,53 \cdot 10^{-6} \text{ m/s}$

Auf diese Weise entstanden sechs verschiedene Modellvarianten (Tab. 1). Sie wurden anhand von Beobachtungspunkten miteinander verglichen (siehe Abb. 14, diesbezüglich berücksichtigte Grundwassermessstellen grün dargestellt). Die Beurteilung erfolgte anhand der Gegenüberstellung der gemessenen und der berechneten Grundwasserspiegelstände sowie aus deren mittleren quadratischen Abweichungssummen.

Tab. 1: Modellvarianten bei der manuellen Sensitivitätsanalyse bezüglich des Parameters „Durchlässigkeitsbeiwert“

		Seeboden	
		gut durchlässig	schlecht durchlässig
KF	variabel	M1A	M1B
	uni	M2A	M2B
	zonen	M3A	M3B

Um beurteilen zu können, wie sensitiv das Grundwasserströmungsmodell auf den veränderten Parameter „Durchlässigkeitsbeiwert“ reagiert, wurden des Rate-Budget pro Zeitschritt sowie der Grundwasserspiegel über die Zeit an verschiedenen Beobachtungspunkten betrachtet. Grundwassergleichenpläne mit Strömungslinien geben Auskunft über die Veränderungen in den Fließwegen aufgrund der Änderung des Parameters „Durchlässigkeitsbeiwert“ in den verschiedenen Modellen.

5. Ergebnisse

5.1. Georadarmessungen im Testfeld

In allen Radargrammen lassen sich drei annähernd horizontale und durchgehende Hauptreflektoren erkennen (Abb. 17). Diese großräumigen Strukturen sind größer als der mit Georadar untersuchte Bereich und unterteilen ihn in vier durchschnittlich 1,5 m mächtige Schichten. Innerhalb dieser vier Schichten treten kleinräumige Strukturen unterschiedlicher Radarfazies auf.

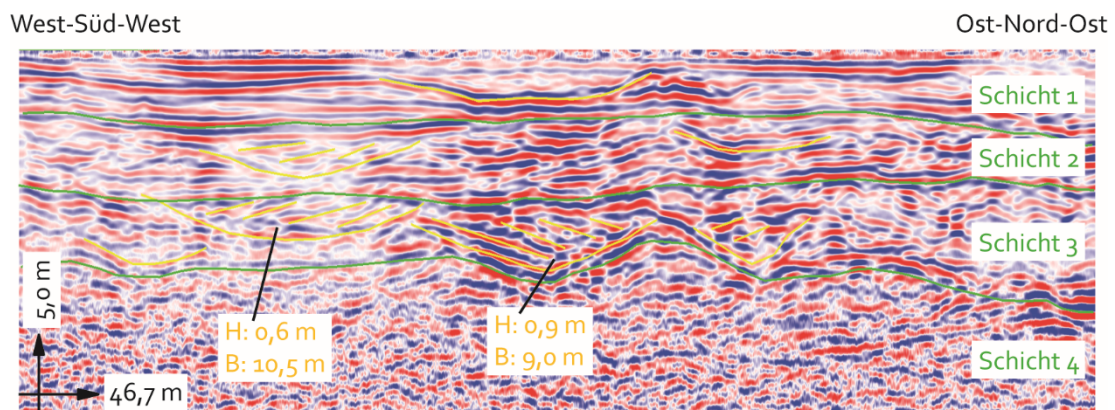
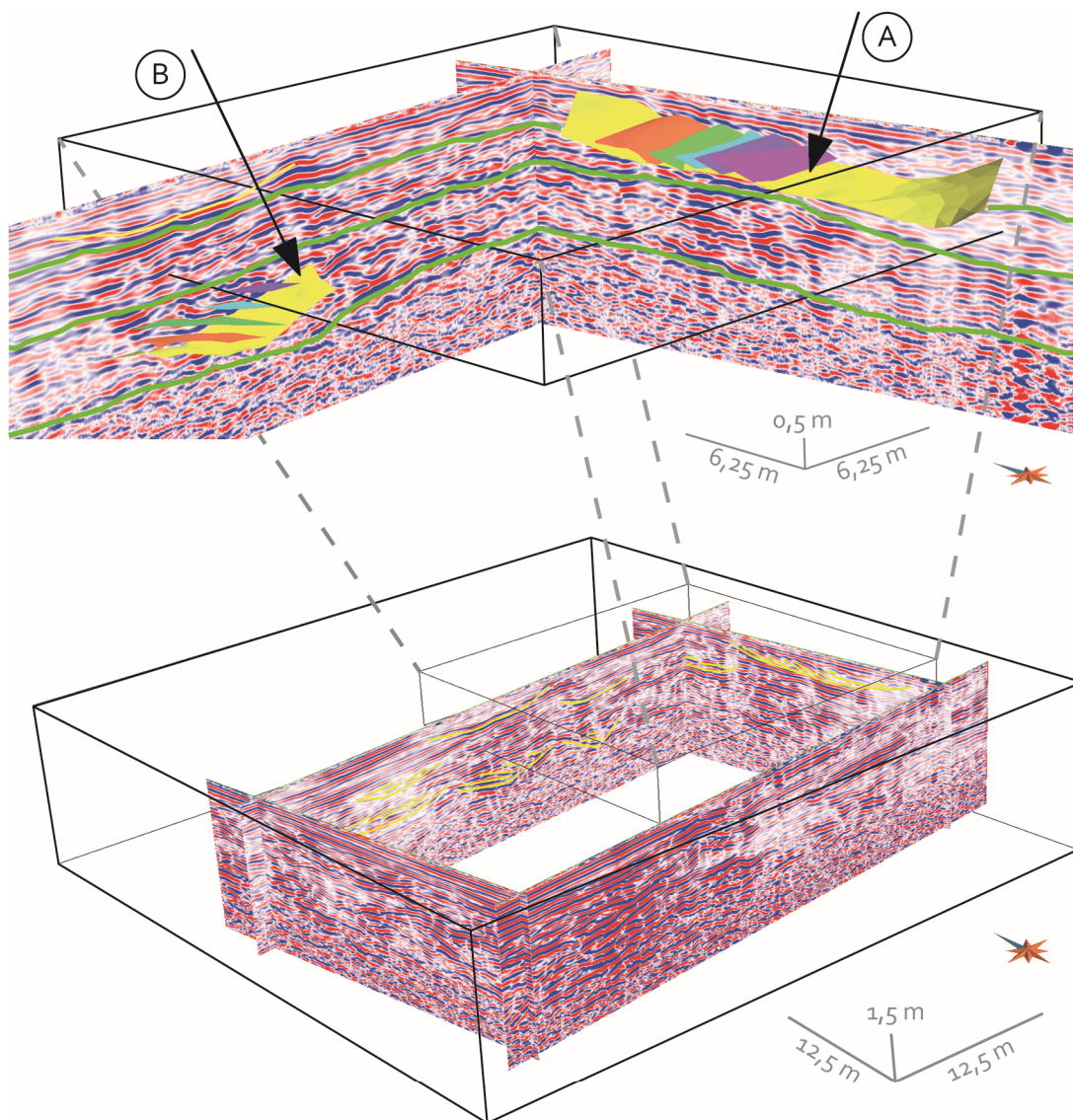


Abb. 17: Radarfazies im Radargramm 94 mit charakteristischen Strukturgrößen

Bei der beispielhaften Betrachtung des 2-dimensionalen Radargramms 94 fallen in Schicht 1 mehrheitlich parallele Reflektoren auf, in welche sich ab und an eine Rinne einschaltet (Abb. 17). In der zweiten Schicht nehmen die parallelen Reflektoren ab und die Rinnenstrukturen zu. Für Schicht 3 sind viele Rinnenstrukturen charakteristisch, wobei keine parallelen Reflektoren mehr auftreten. In der vierten Schicht ist die Radarfazies kleinräumig und chaotisch.

In der 3-dimensionalen Darstellung in Abb. 18 fällt auf, dass sich die zwei exemplarisch ausgewählten kleinräumigen Strukturen lediglich über 2 bis 3 Radargramme verfolgen lassen. Es liegen somit keine durchgehenden Rinnenstrukturen vor, die eine präferentiellen Fließweg darstellen könnten.



Legende

- (A) Laterale Ablagerungselemente
- (B) Zugeschüttetes Kolkloch

— Hauptreflektoren

- Darstellung 2-fach überhöht -

Abb. 18: Georadar-Block mit einer Detailmodell-Zelle (25 x 25 x 2 m) im 3D-Rahmen von 50 x 50 x 6 m; vergrößerter Ausschnitt mit räumlicher Darstellung der Strukturen A und B, sowie der Hauptreflektoren

Vielmehr handelt es sich bei Struktur B in Abb. 18 vermutlich um ein zugeschüttetes Kolkloch, welches auf ein verzweigtes Fluss-System hindeutet. Bei den lateralen Anlagerungselementen innerhalb Schicht 1 (räumliche Darstellung siehe Abb. 18 Struktur A) handelt es sich dagegen wahrscheinlich um Elemente eines mäandrierenden Fluss-Systems. Die parallelen Reflektoren sind charakteristisch für Überflutungssedimente. Die gewonnenen Daten zeigen vermutlich einen Wechsel von einem verzweigten Fluss-System in Schicht 3 hin zu einem mäandrierenden Fluss-System in Schicht 1. Bei den großräumigen Strukturen handelt es sich möglicherweise um Channel Belts, deren Größe nicht erfassbar ist, da der mit Georadar untersuchte Bereich nur einen Teil davon abdeckt.

In Abb. 18 ist zum Größenvergleich eine 25 x 25 x 2 m große Zelle des späteren Detailmodells abgebildet. In der horizontalen Zell-Ausdehnung verdeutlicht sie, dass die großräumigen Strukturen zu groß für eine Grid-Zelle sind, während die kleinräumigen Strukturen zu klein für eine Grid-Zelle sind. Bei Betrachtung der vertikalen Zell-Ausdehnung entspricht die mittels Georadar ermittelte Schichtmächtigkeit annähernd der Zell-Höhe des späteren Detailmodells.

Insgesamt lassen sich innerhalb der untersuchten Radargramme vier Radarfazies unterscheiden (Abb. 19).

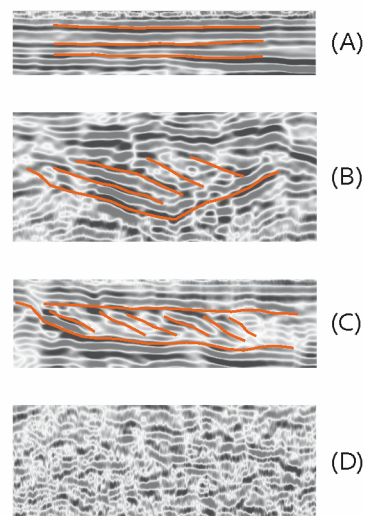


Abb. 19: Radarfazies im untersuchten Bereich des Testfeldes (A) parallele Reflektoren, (B) zugeschüttetes Kolkloch, (C) laterale Anlagerungselemente, (D) chaotische Reflektoren

5.2. Ermittelte Durchlässigkeitsbeiwerte

5.2.1. Siebanalysen

Um die Durchlässigkeitsbeiwerte im Detailmodellgebiet hinsichtlich ihrer vertikalen und horizontalen Unterschiede betrachten zu können, erfolgten insgesamt 149 Siebanalysen. Bei den aus schichtbezogenen Kornsummenkurven nach Białas und Kleczkowski (1970) ermittelten Durchlässigkeitsbeiwerten handelt es sich hauptsächlich um sehr durchlässige bis durchlässige Sand- und Kiesgemische (Anhang, Tab. A1).

Die im Dual-Tube-Verfahren gewonnenen Sedimentproben des Testfeldes (T1A, T2A und K1) ermöglichten insgesamt 65 Sieb- und Schlämmanalysen (Lewin et al. 2014). Das Probenmaterial der Grundwassermessstelle T1A erstreckte sich über eine Tiefe von 15,34 m und wies Ungleichförmigkeitsgrade zwischen minimal 2,3 und maximal 52,8 auf. Der minimal ermittelte Durchlässigkeitsbeiwert lag bei $8,19 \cdot 10^{-9}$ m/s, der maximal ermittelte Durchlässigkeitsbeiwert bei $4,04 \cdot 10^{-3}$ m/s. Das Probenmaterial der Grundwassermessstelle T2A erstreckte sich über eine Tiefe von 11,8 m und wies Ungleichförmigkeitsgrade zwischen minimal 2,1 und maximal 246,0 auf. Der minimal ermittelte Durchlässigkeitsbeiwert lag bei $4,4 \cdot 10^{-5}$ m/s, der maximal ermittelte Durchlässigkeitsbeiwert bei $1,23 \cdot 10^{-3}$ m/s. Das Probenmaterial der Grundwassermessstelle K1 wies Ungleichförmigkeitsgrade zwischen minimal 2,1 und maximal 40,0 auf und erbrachte einen minimalen Durchlässigkeitsbeiwert von $6,75 \cdot 10^{-5}$ m/s sowie maximalen Durchlässigkeitsbeiwert von $2,44 \cdot 10^{-3}$ m/s.

Aus Rückstellproben der Doppelmessstellen 50159/50160, 50161/50162, 50163/50164, 50167/50168 und 50180/50181 stammen 84 weitere Sedimentproben (Lage siehe Abb. 14). Zur Übersicht über die Heterogenität der gewonnenen Daten können die ermittelten Durchlässigkeitsbeiwerte und Parameter dem Anhang, Tab. A2 entnommen werden.

5.2.2. Pumpversuche

5.2.2.1. Konventionelle Pumpversuche

Bei den konventionellen Pumpversuchen in den 1"-Messstellen wurden Absenkungen zwischen 10 cm und 75 cm erreicht. Generell reagierte der Grundwasserspiegel in den Messstellen sehr schnell auf die angelegte Pumprate, sodass 90 % der maximalen Grundwasserspiegelabsenkung innerhalb von zehn Sekunden erfolgte.

Für den konventionellen Pumpversuch in der Grundwassermessstelle T1B diente ein weniger als 1 m entferntes Beobachtungsrohr als Beobachter (Abb. 6). Die Auswertung erfolgte sowohl für Pumpbrunnen und Beobachter gemeinsam, als auch ausschließlich mit Daten aus dem Beobachter und aus dem Pumpbrunnen und erbrachte nach Neumann (1974) Transmissivitäten zwischen $2,4 \cdot 10^{-3}$ und $2,5 \cdot 10^{-3}$ m²/s (siehe auch Tab. 5).

Für den konventionellen Pumpversuch in der Grundwassermessstelle T2B diente T2A als Beobachter. In der Grundwassermessstelle T2A stellte sich, verglichen mit T1A, nach relativ

kurzer Zeit ein Absenkungsplateau ein. Daher wurde hier eine höhere Durchlässigkeit erwartet. Bei der Auswertung nach Neumann (1974) ergab sich eine höhere Transmissivität von $3,0 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$, wenn nur der Beobachter bei der Auswertung berücksichtigt wurde (im Vergleich zu $2,4 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$).

Der Wiederanstieg verlief bei allen Pumpversuchen sehr schnell, was vermutlich auf die konstante Druckhöhe des in direktem hydraulischem Kontakt befindlichen Sees zurückzuführen ist (Drefke 2010).

Der Pumpversuch im Brunnen B16 über 36 Stunden führte zu Absenkungen des Grundwasserspiegels zwischen 1,326 m im Peilrohr des Brunnens B16 und 0,02 m in der Grundwassermessstelle T1B (siehe Tab. 2). Die auf den Zeit-Absenkungskurven basierende Auswertung erfolgte nach Theis (1935) für den ungespannten Aquifer und führte zu den in Tab. 3 dargestellten Ergebnissen. Die zugehörigen Modellkurven sind in Abb. 20, Abb. 21 und Abb. 22 dargestellt.

Tab. 2: Erzielte Absenkungen des Grundwasserspiegels (GWS) in den Grundwassermessstellen (GWM) in verschiedenen Entfernungen zum Brunnen B16

GWM	Entfernung zum Brunnen B16 [m]	Absenkung des GWS [m]
Brunnen B16 (Peilrohr)	0	1,326
GWM_E	205	0,092
T2B	365	0,041
T1B	420	0,020

Tab. 3: Ermittelte Transmissivitäten (T), daraus errechnete Durchlässigkeitsbeiwerte (KF) und Speicherkoeffizienten (S) für den Brunnen B16 in drei verschiedenen Auswertungen

Brunnen B16	T [m ² /s]	KF [m/s]	S [-]
Peilrohr	$3,734 \cdot 10^{-2}$	$1,08 \cdot 10^{-3}$	$5,605 \cdot 10^{-5}$
Mit Beobachter GWM_E	$8,739 \cdot 10^{-2}$	$2,53 \cdot 10^{-3}$	$2,301 \cdot 10^{-2}$
Mit Beobachter T2B	$1,623 \cdot 10^{-1}$	$4,70 \cdot 10^{-3}$	$2,405 \cdot 10^{-2}$

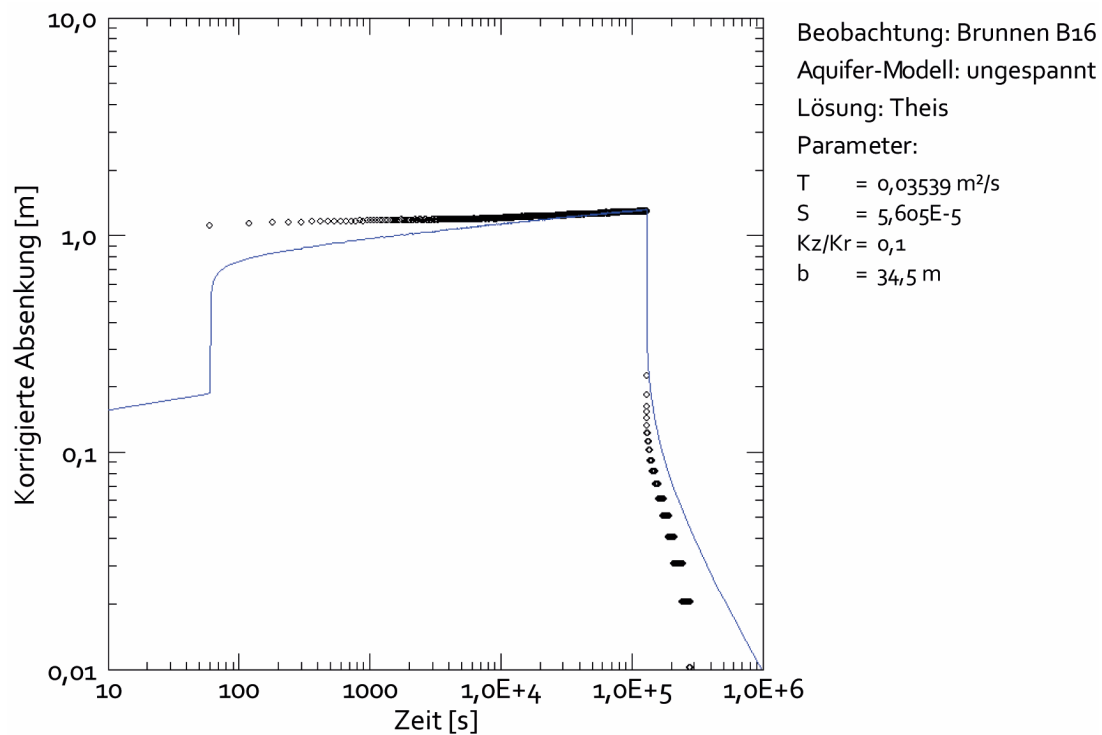


Abb. 20: Modellkurve nach Theis (1935) für den ungespannten Aquifer, basierend auf der Entnahme im Brunnen B16 und den Zeit-Absenkungsdaten im Peilrohr des Brunnens B16

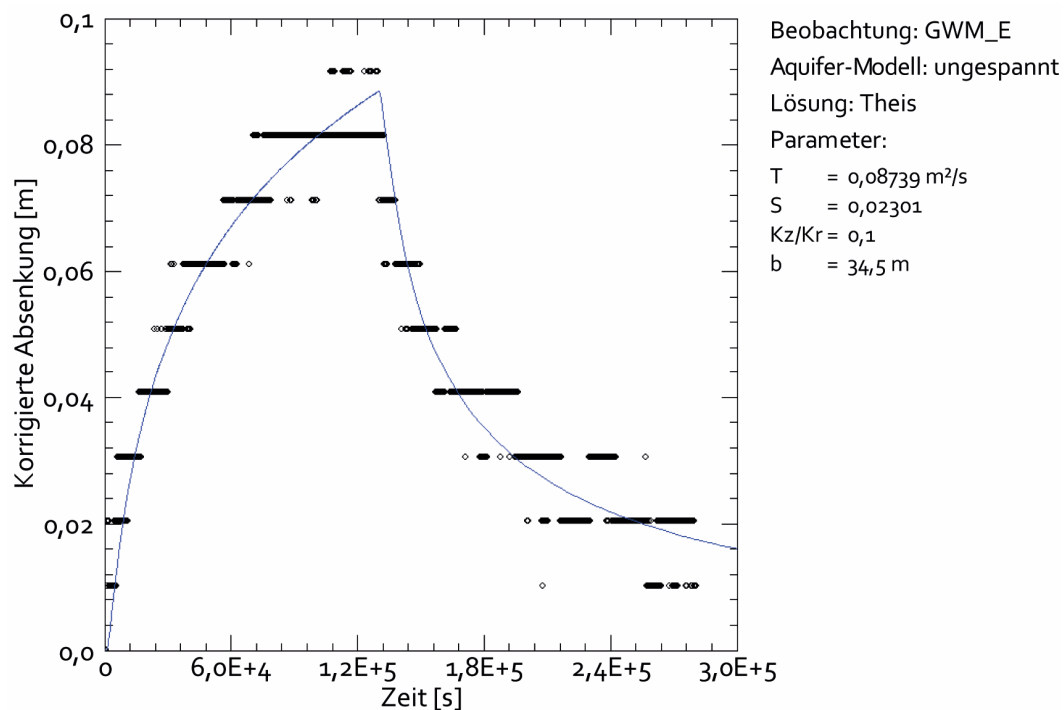


Abb. 21: Modellkurve nach Theis (1935) für den ungespannten Aquifer, basierend auf der Entnahme im Brunnen B16 und den Zeit-Absenkungsdaten in der Grundwassermessstelle GWM_E

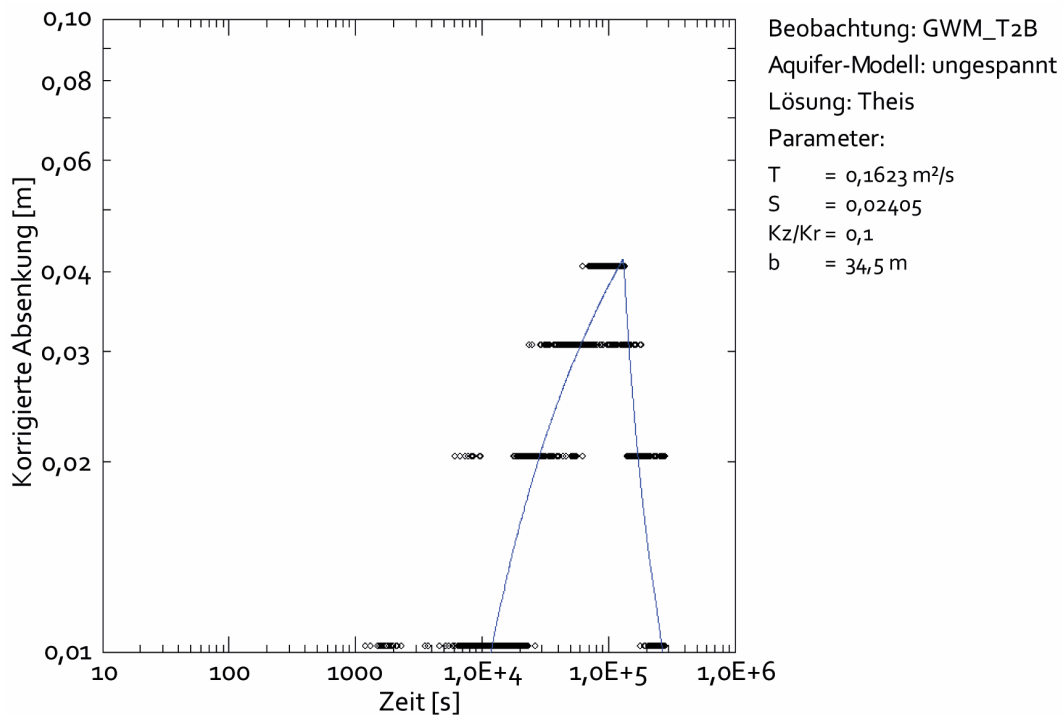


Abb. 22: Modellkurve nach Theis (1935) für den ungespannten Aquifer, basierend auf der Entnahme im Brunnen B16 und den Zeit-Absenkungsdaten in der Grundwassermessstelle T2B

5.2.2.2. Multilevel-Pumpversuche

In den Grundwassermessstellen T1B und T2B erfolgten insgesamt 43 Multilevel-Pumpversuche. Der dabei gewählte Aufbau erbrachte im Mittel Pumpraten von 1,4 l/min, die Absenkungsbeträge von durchschnittlich 72 cm verursachten. Der Schwankungsbereich der Absenkungsbeträge der durchgeführten Multilevel-Pumpversuche in den Grundwassermessstellen T1B und T2B lag zwischen 0,033 und 5,074 m (Abb. 23). Die erheblichen Unterschiede der Absenkungsbeträge sind auf die verschiedenen Durchlässigkeitsbeiwerte der betreffenden Intervalle zurückzuführen. Auf Grund der nur geringfügig voneinander abweichenden Förderraten können aus dem Absenkungsbetrag somit schon vor der eigentlichen Auswertung hochdurchlässige Bereiche identifiziert werden.

Für die Grundwassermessstelle T1B wurde so eine maximale Transmissivität von $3,5 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$ (in der Tiefe 10,13 – 10,93 m) und eine minimale Transmissivität von $2,3 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ (in der Tiefe 16,13 – 16,93 m) ermittelt. Für die Grundwassermessstelle T2B wurde eine maximale Transmissivität von $3,3 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$ (in der Tiefe 9,96 – 10,76 m) und eine minimale Transmissivität von $1,8 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ (in der Tiefe 21,96 – 22,76 m) ermittelt. Die daraus errechneten Durchlässigkeitsbeiwerte können dem Anhang entnommen werden (Anhang, Tab. A3).

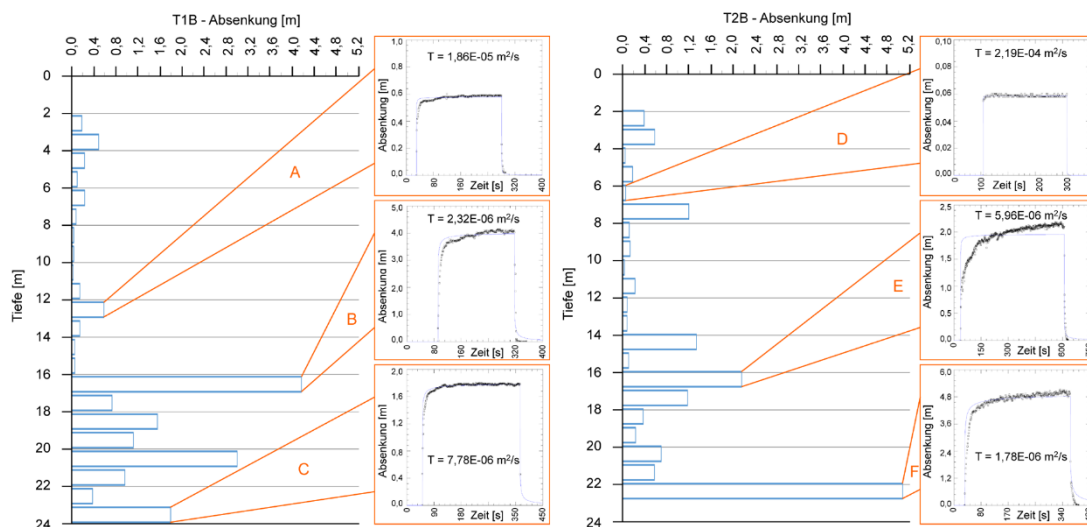


Abb. 23: Durch Multilevel-Pumpversuche in den Grundwassermessstellen T1B und T2B erzielte Absenkungen in den unterschiedlichen Tiefenbereichen mit exemplarischen Zeit-Absenkungs-Kurven nach dem Verfahren von Neumann (1974) sowie den zugehörigen Transmissivitäten (Lewin et al. 2014)

Der Aquifer reagierte in den oberen Metern meist sehr rasch auf die Entnahme und bildete ein Plateau bei mehrheitlich geringer Absenkung aus (Bereiche A und D). In größerer Tiefe wurden auch größere Absenkungsbeträge erzielt (Bereiche B, C, E und F), verbunden mit einer deutlichen Verzögerung bis zur Einstellung des Absenkungsplateaus.

5.2.3. Petrographische Schichtbeschreibungen

Die aus petrographischen Schichtbeschreibungen ermittelten Durchlässigkeitsbeiwerte lagen zwischen $7,55 \text{ m/s}$ und $3,98 \cdot 10^{-8} \text{ m/s}$. In Tab. 4 befinden sich Beispiele aus dem vorhandenen Korngrößenspektrum mit petrographischer Schichtbeschreibung und mittels GCI-PetroKF ermitteltem Durchlässigkeitsbeiwert nach Białas und Kleczkowski (1970). Die gesamten ermittelten Durchlässigkeitsbeiwerte sind dem Anhang zu entnehmen (Anhang, Tab. A4).

5.2.4. Vergleich der Ergebnisse

Sodann wurden die Ergebnisse der verwendeten Methoden miteinander verglichen, um deren jeweilige Vorteile und Nachteile herauszuarbeiten. Auf dieser Grundlage konnte eine Daten-Wichtung nach Methode einerseits sowie Menge und räumlicher Verteilung andererseits vorgenommen werden.

Tab. 4: Beispiele von ermittelten Durchlässigkeitsbeiwerten aus petrographischen Schichtbeschreibungen

Brunnen/ Grund- wassermess- stelle	Schicht	Tiefe [m] von-bis	Importierte petrographische Schicht- beschreibung	Erkannte petrographische Schicht- beschreibung	KF [m/s]
Brunnen B16	9	8,00- 9,00	gS, fg, mg, ms', gg'	gS, mg, fg, gg', ms'	$3,23 \cdot 10^{-3}$
Brunnen B16	45	48,00-49,00	fS, ms, gs'	fS, ms, gs'	$1,80 \cdot 10^{-5}$
50168	11	6,50- 7,00	G	mG, gg, fg	$2,09 \cdot 10^{-1}$
50180	16	11,00-11,25	U,t	U,t	$3,98 \cdot 10^{-8}$
50163	3	0,80- 2,00	mS,fg, mg, fs'	mS, mg, fg, fs'	$1,88 \cdot 10^{-4}$

5.2.4.1. Konventionelle Pumpversuche versus Multilevel-Pumpversuche

Zur Überprüfung der tiefenorientierten Multilevel-Pumpversuche fand ein messstellenbezogener Vergleich von konventionellen Pumpversuchen mit den aufsummierten Einzeltransmissivitäten aus den zugehörigen Multilevel-Pumpversuchen statt (Tab. 5):

Dabei lieferten die Lösungen nach Neumann (1974) die geringsten Abweichungen (Fehlerfaktor 1,1–1,6), während die Lösungen nach Theis (1935) deutliche Abweichungen aufweist, wenn der konventionelle Pumpversuch ohne Beobachter durchgeführt wurde (Fehlerfaktor 0,9–4,1).

Somit zeigt der Vergleich, dass die Summe der Einzeltransmissivitäten aus den Multilevel-Pumpversuchen den Transmissivitäten aus dem entsprechenden konventionellen Pumpversuch gleicht, wenn das Auswerteverfahren nach Neumann (1974) angewendet wurde.

Tab. 5: Vergleich der Transmissivitäten (T) der konventionellen Pumpversuche (KPV) mit den Summen der Einzeltransmissivitäten (ET) der Multilevel-Pumpversuche (MLPV) aus den Grundwassermessstellen T1B und T2B (Lewin et al. 2014, verändert)

Messstellen KPV	KPV Theis (1935) T [m ² /s]	MLPV Theis (1935) ET [m ² /s]	Fehler- faktor IPV/MLPV	IPV Neumann (1974) T [m ² /s]	MLPV Neumann (1974) ET [m ² /s]	Fehler- faktor IPV/MLPV
T1B						
ohne Beobachter	$1,1 \cdot 10^{-2}$	$2,7 \cdot 10^{-3}$	4,1	$2,5 \cdot 10^{-3}$	$2,1 \cdot 10^{-3}$	1,2
mit Beobachter	$2,4 \cdot 10^{-3}$	$2,7 \cdot 10^{-3}$	0,9	$2,4 \cdot 10^{-3}$	$2,1 \cdot 10^{-3}$	1,1
T2B						
ohne Beobachter	$7,2 \cdot 10^{-3}$	$2,0 \cdot 10^{-3}$	3,6	$3,0 \cdot 10^{-3}$	$1,9 \cdot 10^{-3}$	1,6
mit Beobachter	$2,5 \cdot 10^{-3}$	$2,0 \cdot 10^{-3}$	1,3	$2,4 \cdot 10^{-3}$	$1,9 \cdot 10^{-3}$	1,3

5.2.4.2. Multilevel-Pumpversuche versus Siebanalysen

Um die Ergebnisse der Multilevel-Pumpversuche mit den Sieb- und Schlämmanalysen vergleichen zu können, erfolgte eine Umrechnung der Einzeltransmissivitäten in Durchlässigkeitsbeiwerte. Im Vergleich zeigt sich zunächst die unterschiedliche Anzahl der Daten aus den Multilevel-Pumpversuchen einerseits und den Sieb- und Schlämmanalysen andererseits pro Messstelle (Abb. 24):

Die Multilevel-Pumpversuche in den 1"-Messstellen T1B (22 Versuche) und T2B (21 Versuche) erfolgten tiefenorientiert, jeweils über 80 cm große Abschnitte und deckten somit den verfilterten Bereich der Filterrohre ab. Die Enden der Filterrohre (jeweils 10 cm) waren nicht verfiltert und wurden deshalb nicht bei den Multilevel-Pumpversuchen berücksichtigt. Bei den Sieb- und Schlämmanalysen für die 1¼"-Messstellen T1A (25 Analysen) und T2A (22 Analysen) erfolgte die Bestimmung der Durchlässigkeitsbeiwerte dagegen schichtbezogen. Dadurch sind die durch ein Messergebnis abgedeckten Bereiche der Multilevel-Pumpversuche häufig mächtiger als die Schichten der Sieb- und Schlämmanalysen.

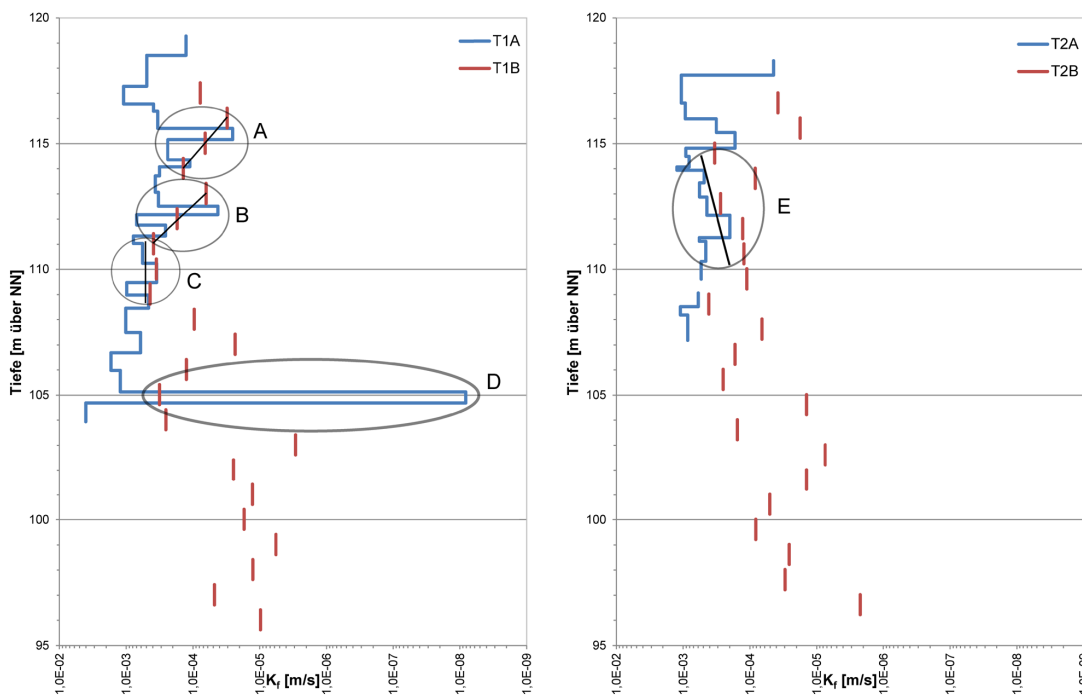


Abb. 24: Durchlässigkeitsbeiwerte, ermittelt aus Korngrößenanalysen nach Białaś und Kleczkowski (1970) (T1A und T2A) im Vergleich mit Durchlässigkeitsbeiwerten, ermittelt aus Multilevel-Pumpversuchen nach Neumann (1974) (T1B und T2B) (Lewin et al. 2014)

So wurden geringmächtige Schichten nicht hinreichend im 80 cm-Intervall der Multilevel-Pumpversuche erfasst (Abb. 24, Bereich D). Die Durchlässigkeitsbeiwerte der Multilevel-

Pumpversuche zeigen teilweise einen ähnlichen Trendverlauf wie die Durchlässigkeitsbeiwerte aus den Siebanalysen (Abb. 24, Bereiche A, B, C und E). Dabei sind die Durchlässigkeitsbeiwerte der Multilevel-Pumpversuche jedoch oft um eine Zehnerpotenz kleiner als jene der Sieb- und Schlämmanalysen.

5.2.4.3. Siebanalysen versus petrographische Schichtbeschreibungen

Für die Bohrungen im Gebiet des Detailmodells, für die Rückstellproben vorlagen, gab es die Möglichkeit, Durchlässigkeitsbeiwerte, ermittelt anhand von Siebanalysen, mit Durchlässigkeitsbeiwerten, ermittelt anhand petrographischer Bohrgutbeschreibungen, miteinander zu vergleichen. Beispielhaft erfolgt ein Vergleich anhand der Grundwassermessstelle 50180 (Tab. 6).

Tab. 6: Durchlässigkeitsbeiwerte, basierend auf Siebanalysen (SA) im Vergleich mit Durchlässigkeitsbeiwerten, ermittelt über petrographische Bohrgutbeschreibungen in der Software GCI-PetroKF (PKF) für die Grundwassermessstelle 50180 (Verfahren jeweils nach Biały und Kleczkowski 1970); zur Ergänzung ist die via Siebanalyse ermittelte Bodenart angegeben sowie die in der Bohrdatenbank (DB) vermerkte petrographische Bohrgutbeschreibung, welche die Grundlage für die mit GCI-PetroKF ermittelten Werte darstellt

m unter GOK von bis		SA [m/s]	PKF [m/s]	Fehler SA/PKF	Bodenart (aus SA)	Bodenart (aus DB)
2,65	4,00	$7,51 \cdot 10^{-4}$	$1,05 \cdot 10^{-3}$	0,7	gS, ms, fg', mg'	gS,ms,fg
4,00	4,50	$5,25 \cdot 10^{-4}$	$1,09 \cdot 10^{-3}$	0,5	S, gg, fg', mg'	gS,g,ms
4,50	4,65	$9,49 \cdot 10^{-4}$	$1,09 \cdot 10^{-3}$	0,9	S, G	gS,g,ms,x'
4,65	6,00	$3,19 \cdot 10^{-3}$	$1,09 \cdot 10^{-3}$	2,9	G, gs, ms'	gS,g*,ms,x'
6,00	7,30	$1,36 \cdot 10^{-3}$	$2,38 \cdot 10^{-3}$	0,6	gS, fg, mg, ms'	gS,mg*,fg*,gg,ms
7,30	8,00	$1,72 \cdot 10^{-3}$	-	-	S, G	X,gS,g
8,00	10,50	$7,34 \cdot 10^{-4}$	$1,09 \cdot 10^{-3}$	0,7	gS, ms, mg', gg'	gS,g,ms
10,50	11,00	$3,59 \cdot 10^{-4}$	$1,09 \cdot 10^{-3}$	0,3	mS, gS, mg'	gS,ms,g'
11,00	11,25	$1,45 \cdot 10^{-5}$	$3,98 \cdot 10^{-8}$	364,9	S, t', u', mg'	U,t
11,25	12,00	$2,21 \cdot 10^{-4}$	$1,48 \cdot 10^{-3}$	0,1	S, mg', gg'	gS,mg,fg,ms,gg'
12,00	12,40	$4,13 \cdot 10^{-4}$	$1,09 \cdot 10^{-3}$	0,4	S, gg, fg', mg'	gS,g*,ms
12,40	13,60	$3,33 \cdot 10^{-4}$	$1,25 \cdot 10^{-3}$	0,3	mS, gs-, fg', mg'	gS,mg,fg,ms
13,60	14,45	$5,97 \cdot 10^{-4}$	$1,09 \cdot 10^{-3}$	0,5	S, gg, fg', mg'	gS,g,ms,x'
14,45	17,55	$3,13 \cdot 10^{-3}$	$1,09 \cdot 10^{-3}$	2,9	G, gs, ms'	gS,g*,x,ms
17,55	19,30	$2,20 \cdot 10^{-2}$	$3,39 \cdot 10^{-2}$	0,6	G, gs'	mG,fG,gs*,x,gg
19,30	19,60	-	$3,98 \cdot 10^{-8}$	-	U, t, fs, ms'	U,t
19,60	22,45	$2,35 \cdot 10^{-3}$	$8,21 \cdot 10^{-3}$	0,3	gG, mg, ms', gs', fg'	G,gs*,x
22,45	25,20	$1,07 \cdot 10^{-3}$	$1,48 \cdot 10^{-3}$	0,7	gS, ms, fg', mg'	gS,mg,fg,ms,gg'
25,20	25,50	-	-	-	T, u, fs', ms'	-

Der Vergleich zeigt zum einen eine gute Übereinstimmung der ermittelten mittleren Durchlässigkeitsbeiwerte, zum anderen aber auch eine Schwäche der Bestimmung von Durchlässigkeitsbeiwerten mittels GCI-PetroKF: Für die Schicht 11,00 – 11,25 m wurde mittels Siebanalyse ein Durchlässigkeitsbeiwert von $1,45 \cdot 10^{-5}$ m/s ermittelt und als Bodenart S, t', u', mg' ausgegeben. In der Bohrdatenbank ist die petrographische Schichtbeschreibung U, t vermerkt, die unter Verwendung der Software GCI-PetroKF zu einem Durchlässigkeitsbeiwert von $3,98 \cdot 10^{-8}$ m/s führt. Dies verdeutlicht die Abhängigkeit von der Qualität der petrographischen Schichtbeschreibung, wenn diese als Grundlage der Bestimmung des Durchlässigkeitsbeiwertes herangezogen wird.

5.2.5. Ergebnis des Vergleiches

Die in den Multilevel-Pumpversuchen ermittelten Durchlässigkeitsbeiwerte und die in den Siebanalysen eines entsprechenden Tiefenbereichs ermittelten Durchlässigkeitsbeiwerte zeigen einen sehr ähnlichen Trendverlauf mit der Tiefe. Systematisch wurden bei den Pumpversuchen jedoch um rund eine Größenordnung niedrigere Durchlässigkeitsbeiwerte ermittelt.

Als mögliche Ursache kommt der Messstellenausbau im Lost-Tipp-Verfahren für die 1"-Grundwassermessstellen (T1B und T2B) in Betracht. Da bei diesem Bohrverfahren das Sediment verdrängt und nicht entnommen wird, führt dies radial um die Bohrung zu einer potenziellen Verdichtung des umliegenden Sediments. Diese sehr wahrscheinliche Kompaktion des Aquifermaterials im direkten Bereich um die Messstelle könnte zu einer Verkleinerung des Durchlässigkeitsbeiwertes führen.

Eine weitere Ursache könnte im heterogenen Schichtenaufbau des Aquifers selbst liegen, da bei einem horizontalen Grundwasserzustrom zum jeweils abgepackten Bereich das harmonische Mittel der Durchlässigkeitsbeiwerte der hierbei durchströmten Sedimentkörper vom geringdurchlässigsten Element bestimmt wird.

Bei zukünftigen Untersuchungen sollten deshalb Multilevel-Pumpversuche auch in den 1 1/4"-Grundwassermessstellen (T1A und T2A) durchgeführt werden, die im Dual-Tube-Verfahren hergestellt wurden. Diese Messstellen dürften durch den kerngewinnenden Bohrvorgang eine wesentlich geringere Kompaktion und damit Beeinflussung des umgebenden Bodenkörpers erfahren haben.

Zusätzlich könnte die Größe eines Messintervalls bei den Multilevel-Pumpversuchen reduziert werden, um so eine genauere Parallelisierung von Siebanalysen- und Pumpversuchsabschnitten zu ermöglichen. Die Größe des Messintervalls wird jedoch im Wesentlichen durch die Dimensionierung des Druckloggers bestimmt, weshalb mit der vorhandenen Ausrüstung derzeit das kleinstmögliche Messintervall 40 cm beträgt.

Liegen keine Rückstellproben vor oder ist nicht ausreichendes Bohrgut-Material für Siebanalysen vorhanden, werden dennoch Durchlässigkeitsbeiwerte für die Parametrisierung des geologischen Modells benötigt. Nun könnte man aus Richtwerttabellen überschlägige

Durchlässigkeitsbeiwerte ablesen. Alternativ können die in der Bohrdatenbank erfassten Informationen zu petrographischen Schichtbeschreibungen mittels der Software GCI-PetroKF bezüglich des Durchlässigkeitsbeiwertes ausgewertet werden. Dabei ist zu beachten, dass nach Fuchs und Nillert (2010) die Bohrgut-Ansprache durch geologische Sachbearbeiter eher zu fein erfolgt, was zu eher zu kleinen Durchlässigkeitsbeiwerten führt.

Bei der Ermittlung von Durchlässigkeitsbeiwerten aus petrographischen Schichtbeschreibungen in der vorliegenden Arbeit traten Schwierigkeiten (außerhalb des Gültigkeitsbereiches) bei der Erfassung von sehr feinem und sehr grobem Material auf, weshalb für diese beiden Fälle Abschätzungen getroffen wurden. Für die Mehrheit der Datensätze funktionierte die Berechnung ausgezeichnet. Das verwendete Verfahren ermöglichte mehrheitlich eine schichtbezogene Abschätzung der Durchlässigkeitsbeiwerte.

Die angewendeten Methoden zur Ermittlung von Durchlässigkeitsbeiwerten weisen, wie in den vorangegangenen Kapiteln beschrieben, Vorteile und Nachteile auf (Tab. 7). Für die weitere Verwendung der Durchlässigkeitsbeiwerte sowohl im Detailmodell als auch im Grundwasserströmungsmodell ist es zum einen wichtig schichtbezogene Daten zu verwenden, zum anderen ist darauf zu achten den 3D-Raum so gut wie möglich auszufüllen.

Tab. 7: Vorteile und Nachteile der zur Ermittlung von Durchlässigkeitsbeiwerten in dieser Arbeit verwendeten Methoden

Methode	Vorteile	Nachteile
Siebanalysen	<ul style="list-style-type: none"> • schichtbezogene Werte • vertikale und horizontale Heterogenität kann lokal erfasst werden 	<ul style="list-style-type: none"> • bei großen Korngrößen ausreichendes Probenmaterial notwendig
Lokale Pumpversuche	<ul style="list-style-type: none"> • vertikale und horizontale Heterogenität kann lokal erfasst werden 	<ul style="list-style-type: none"> • Abhängig vom Messstellenaufbau (Bereiche mit Filter) • Keine schichtbezogenen Werte
Regionale Pumpversuche	<ul style="list-style-type: none"> • regionaler Wert 	<ul style="list-style-type: none"> • Keine Aussagen zu vertikaler und horizontaler Heterogenität möglich
Petrographische Bohrgutbeschreibungen	<ul style="list-style-type: none"> • Abschätzung von Durchlässigkeitsbeiwerten, wenn keine Siebanalysen und Pumpversuche möglich sind 	<ul style="list-style-type: none"> • Abhängig von Genauigkeit der Bohrgutbeschreibungen • Bohrgutbeschreibungen durch Sachbearbeiter eher zu klein, Durchlässigkeitsbeiwerte daher eher zu klein (Fuchs 2010) • Schluff und Ton liegen oft nicht im Gültigkeitsbereich der Software (Panteleit et al. 2013)

Die Berücksichtigung der horizontalen und der vertikalen Heterogenität bei der Grundwassermodellierung erfordert für die Parametrisierung des Modells Kenntnis über eine möglichst große Anzahl an möglichst räumlich gleichmäßig verteilten Durchlässigkeitsbeiwerten. Keine der verwendeten Methoden zur Ermittlung von Durchlässigkeitsbeiwerten ist hierfür im Arbeitsgebiet allein geeignet. Dementsprechend wurde eine Methoden-Kombination nach vorheriger Wichtung als bestmöglicher Kompromiss angesehen.

Die Dichte der bestimmten Durchlässigkeitsbeiwerte variiert im Detailmodellgebiet über die Fläche und über die Tiefe sehr stark. Dabei gibt es Bereiche, in denen die Datendichte aufgrund fehlender Bohrungen und Messstellen sehr gering ist (Abb. 4). Hier kann ein regionaler Durchlässigkeitsbeiwert, gewonnen über einen Pumpversuch im Brunnen B16 als Hintergrundwert angenommen werden. In Bereichen mit Durchlässigkeitsbeiwerten aus Siebanalysen, kommt diesen Werten eine größere Bedeutung als dem regionalen Wert zu, weil sie aus Sedimentproben ermittelt wurden und die vertikale Heterogenität berücksichtigt werden kann. Liegen für Bohrlokationen petrographische Schichtbeschreibungen vor, kommt diesen Werten ebenfalls eine größere Bedeutung, als dem regionalen Wert zu. Sie ersetzen den regionalen Wert dann, wenn keine Sedimentproben vorliegen und somit keine zuverlässigen Durchlässigkeitsbeiwerte aus Sieb- und Schlämmanalysen. Den lokalen schichtbezogenen Pumpversuchen wird die geringste Bedeutung zugewiesen, da sich der Begriff „schichtbezogen“ hier auf versuchsaufbaubedingte Messintervalle gleicher Mächtigkeit bezieht und nicht auf geologische Schichten mit variabler Mächtigkeit. Entsprechend der vorangegangenen Ausführungen ergibt sich eine Wichtung der Durchlässigkeitsbeiwerte für die weiteren Arbeiten entsprechend Methode und Datendichte, von Siebanalysen (größtes Gewicht) über petrographische Schichtbeschreibungen und den regionalen Pumpversuch zu den lokalen Pumpversuchen (geringes Gewicht).

Basierend auf dieser Wichtung wurden für den Bereich des Detailmodellgebietes 916 Durchlässigkeitsbeiwerte zusammengestellt (Anhang, Tab. A4). Aufgrund der angeführten Nachteile der Ermittlung von Durchlässigkeitsbeiwerten aus petrographischen Schichtbeschreibungen, wurden folgende Annahmen getroffen:

- Für sehr feinkörnige und sehr grobkörnige Sedimente, für welche oftmals aufgrund eines zu großen Ungleichförmigkeitsgrades kein Durchlässigkeitsbeiwert ermittelt werden konnte, wurden anhand der petrographischen Schichtbeschreibung Durchlässigkeitsbeiwerte von $8,19 \cdot 10^{-9}$ m/s (sehr feinkörnige Sedimente) beziehungsweise $9,89 \cdot 10^{-1}$ m/s (sehr grobkörnige Sedimente) festgesetzt.
- Ermittelte Durchlässigkeitsbeiwerte von 7,55 m/s sind nicht realistisch, diese Werte wurden durch den nächstgeringeren Durchlässigkeitsbeiwert ($9,89 \cdot 10^{-1}$ m/s) ersetzt.

5.3. Hydraulische Daten

Die Erhebung hydraulischer Daten erfolgte zum einen zur Untersuchung der See-Grundwasser-Interaktion und zum anderen im Rahmen eines Markierversuches von der Grundwassermessstelle T2A zum Brunnen B16.

5.3.1. Zeitreihen des See- und Grundwasserspiegels

Zeitreihen des See- und Grundwasserspiegels wurden von Februar 2011 bis Februar 2012 aufgezeichnet und zeigen eine strenge Saisonalität (Abb. 25). Zwischen März und November 2011 sank sowohl der Seewasserspiegel als auch der Grundwasserspiegel in den Grundwassermessstellen T1B (seenah) und T2B (circa 55 m Abstrom) kontinuierlich, während von November 2011 bis März 2012 alle Wasserspiegel anstiegen. Durch einen trockenen Winter 2011/2012 war der Wasserspiegel im Februar 2012 ungefähr 20 cm niedriger als im Februar 2011.

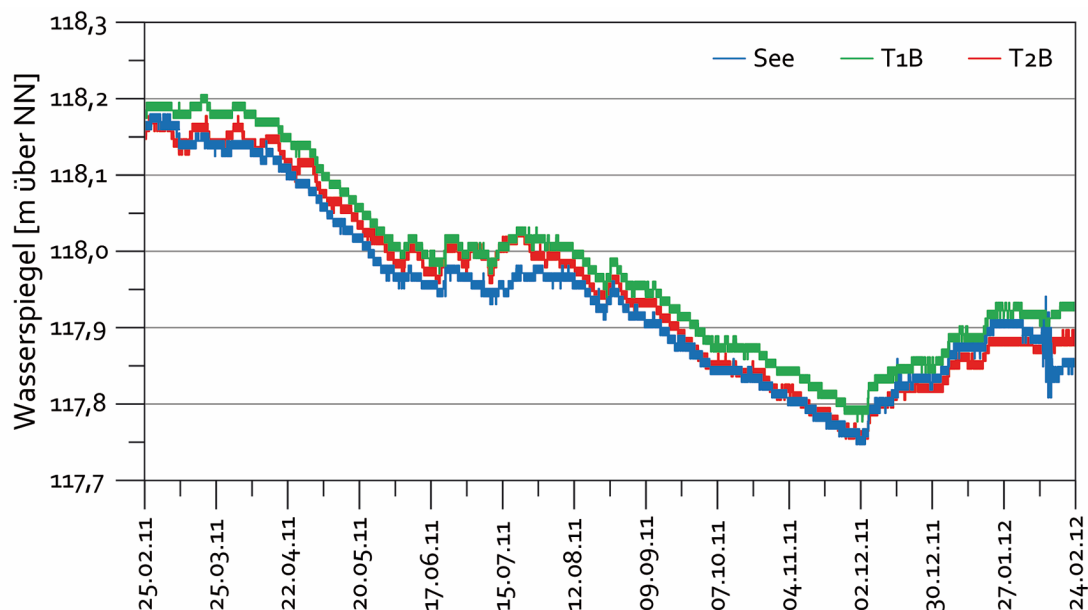


Abb. 25: Seewasserspiegel und Grundwasserspiegel im Testfeld

Die Wasserspiegel der zwei Grundwassermessstellen und im See waren sehr ähnlich. Der Wasserspiegel in der Grundwassermessstelle T1B war geringfügig höher als der Seewasserspiegel (bis zu 4 cm auf 5 m Entfernung). Zwischen Frühling und Herbst war der Unterschied im Vergleich zu den Wintermonaten deutlicher ausgeprägt. Dies ist vermutlich ein Effekt der Abbauaktivitäten in den angrenzenden aktiven Baggerseen, die von März bis Dezember stattfinden, wenn die Temperaturen gewöhnlich über 0 °C liegen. Die aufgezeichneten Wasserspiegel zeigen an, dass Grundwasser über den ganzen Beobachtungszeitraum in den

See exfiltriert. Der Grundwasserspiegel in der Grundwassermessstelle T2B war ebenfalls geringfügig (circa 3 cm) niedriger als in T1B, bei einer Distanz von 55 m zwischen beiden Messstellen.

Die Auswirkungen des Pumpbetriebes im Brunnen B16 auf den Grundwasserspiegel im Testfeld verdeutlicht Abb. 26. Während zwei Monaten mit periodischem Pumpbetrieb sank der Grundwasserspiegel in der Grundwassermessstelle T2B (365 m entfernt vom Brunnen B16) ungefähr 4 cm und in der Grundwassermessstelle T1B (420 m entfernt vom Brunnen B16) circa 2 cm. Die Reaktion auf den Pumpbetrieb erfolgte fast unverzüglich.

Basierend auf den Wasserspiegelmessungen im See und in den Grundwassermessstellen des Testfeldes kann, parallel zum Seeufer, in der Nähe von der Grundwassermessstelle T1B, eine NNE – SSW verlaufende Wasserscheide, vermutet werden. Der Unterschied zwischen dem Seewasserspiegel und dem Grundwasserspiegel in der Grundwassermessstelle T1B beträgt 4 cm auf eine Distanz von 5 m. Dementsprechend exfiltriert Grundwasser während des gesamten Beobachtungszeitraumes in den See. Wird der Brunnen B16 in Betrieb genommen, sinkt der Grundwasserspiegel im Testfeld ab; zum Beispiel während des 36-stündigen Pumpversuches auf annähernd 2 cm in der Grundwassermessstelle T1B und circa 3 cm in der Grundwassermessstelle T2B. Die Position der Wasserscheide wurde während des Pumpversuches nicht beeinflusst, aber die Differenz zwischen Grundwasser- und Seewasserspiegel reduziert sich. Aus diesem Grund kann, unter den im Testfeld studierten Bedingungen, ein Risiko für die Trinkwasserqualität ausgeschlossen werden.

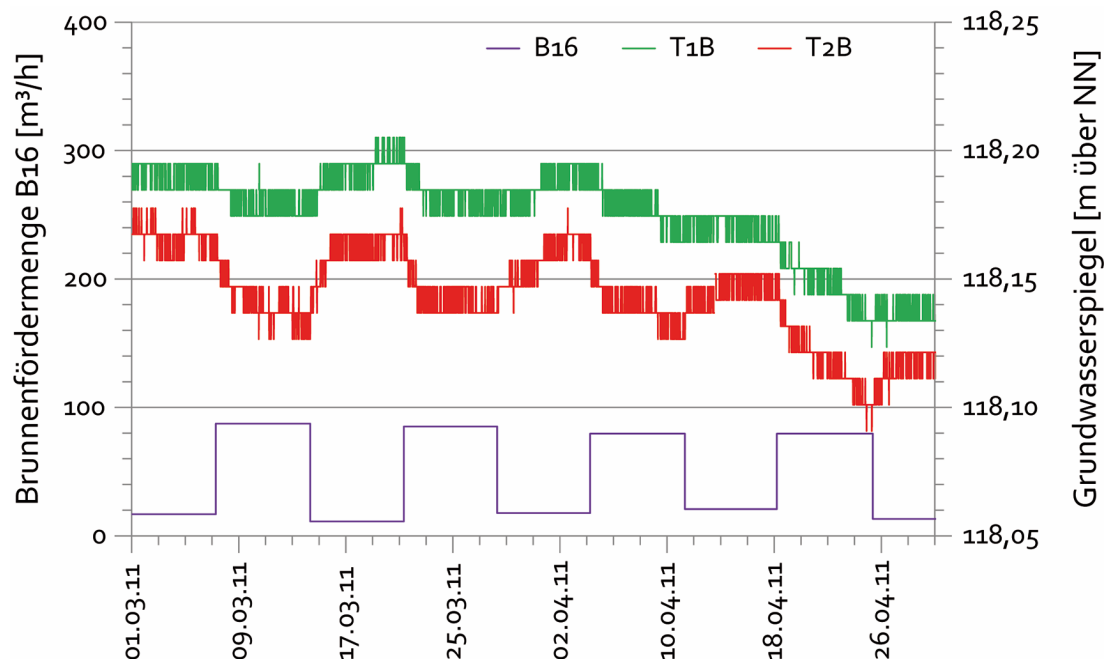


Abb. 26: Einfluss des Pumpbetriebes im Brunnen B16 auf den Grundwasserspiegel im Testfeld

5.3.2. Zeitreihen der See- und Grundwassertemperatur

Hochaufgelöste Multilevel-Temperaturmessungen im See und in den Grundwassermessstellen wurden von Oktober 2010 bis Februar 2012 aufgezeichnet, mit einer 6-wöchigen Datenlücke in den Seemessungen aufgrund eines Batterie-Fehlers (Abb. 27).

Die im See gemessenen Wassertemperaturen zeigten zwischen Oktober 2010 und März 2011 gleichbleibende Temperaturen mit einer minimalen Temperatur von 3,7 °C im Februar 2011. Dies deutet auf eine komplette Durchmischung der Wassersäule während dieser Zeit hin. Eine markante Temperaturschichtung entwickelte sich während des Frühlings und Sommers. Der maximale Temperaturunterschied zwischen dem tiefsten Sensor (TK8) und dem obersten Sensor (TK1) im See betrug circa 14 °C im August 2011 mit annähernd 24 °C im TK1. Die höchsten Temperaturen im TK8 wurden im Oktober/November 2012 aufgezeichnet (14 °C).

Während der Messperiode variierte die Verteilung der Grundwassertemperatur in den Grundwassermessstellen zwischen Minimum 5 °C und Maximum 19 °C. Minimale und maximale Temperaturwerte wechselten von Grundwassermessstelle zu Grundwassermessstelle in Datum, Zeit und Tiefe. Die gemessenen Grundwassertemperaturen zeigten saisonale Temperaturschwankungen mit der typischen Temperaturdämpfung und einer zunehmenden Zeitverschiebung mit zunehmender Tiefe.

Um den Einfluss des Brunnens B16 auf den Grundwasserspiegel und die Grundwassertemperaturen im Testfeld zu ermitteln, wurde im Juli 2011 ein Pumpversuch durchgeführt. Vor dem Versuchsstart wurden alle Datenlogger synchronisiert und die Frequenz der Datenerfassung von 15 Minuten auf 1 Minute umgeändert. Um Beeinflussungen mit den Abbau-Aktivitäten in den Baggerseen zu vermeiden, wurde der Versuch am Wochenende über 36 Stunden durchgeführt. Die Pumprate war 110 m³/h.

Obwohl nah am Auflösungsvermögen der Drucksensoren ist in beiden Grundwassermessstellen unverzüglich eine deutliche Reaktion auf den Pumpbetrieb durch fallende Grundwasserspiegel zu erkennen. Grundwassermessstelle T1B zeigt eine Absenkung von insgesamt 2 cm und T2B zeigt eine maximale Absenkung von 3 cm am Ende des Testes (Abb. 29). Die Unterschiede in der Absenkung zwischen den Grundwassermessstellen T1B und T2B werden aufgrund des Auflösungsvermögens der Drucksensoren als nicht maßgeblich angesehen. Die Auswertung des Pumpversuches erbrachte einen Durchlässigkeitsbeiwert von circa $2,5 \cdot 10^{-3}$ m/s.

Auch die hochaufgelösten Multilevel-Temperaturmessungen wurden durch den Pumpversuch beeinflusst (Abb. 28). Die Reaktion auf die Grundwasserentnahme erfolgte nahezu sofort: Der Temperaturdatensatz von TK4-114,9 m zeigt in allen Grundwassermessstellen diese fast unmittelbare Reaktion. Die Grundwassertemperaturen stiegen mit Beginn der Wasserentnahme an, am deutlichsten in der Grundwassermessstelle T2A mit circa 0,45 °C.

Die Temperaturen sanken nach dem Ende der Wasserentnahme ab. Im Gegensatz dazu stiegen die Grundwassertemperaturen in TK7-111,9 m nur in der Grundwassermessstelle T2A (circa 0,2 °C) und F3 (50 m vom Seeufer entfernt, 365 m vom Brunnen B16 entfernt).

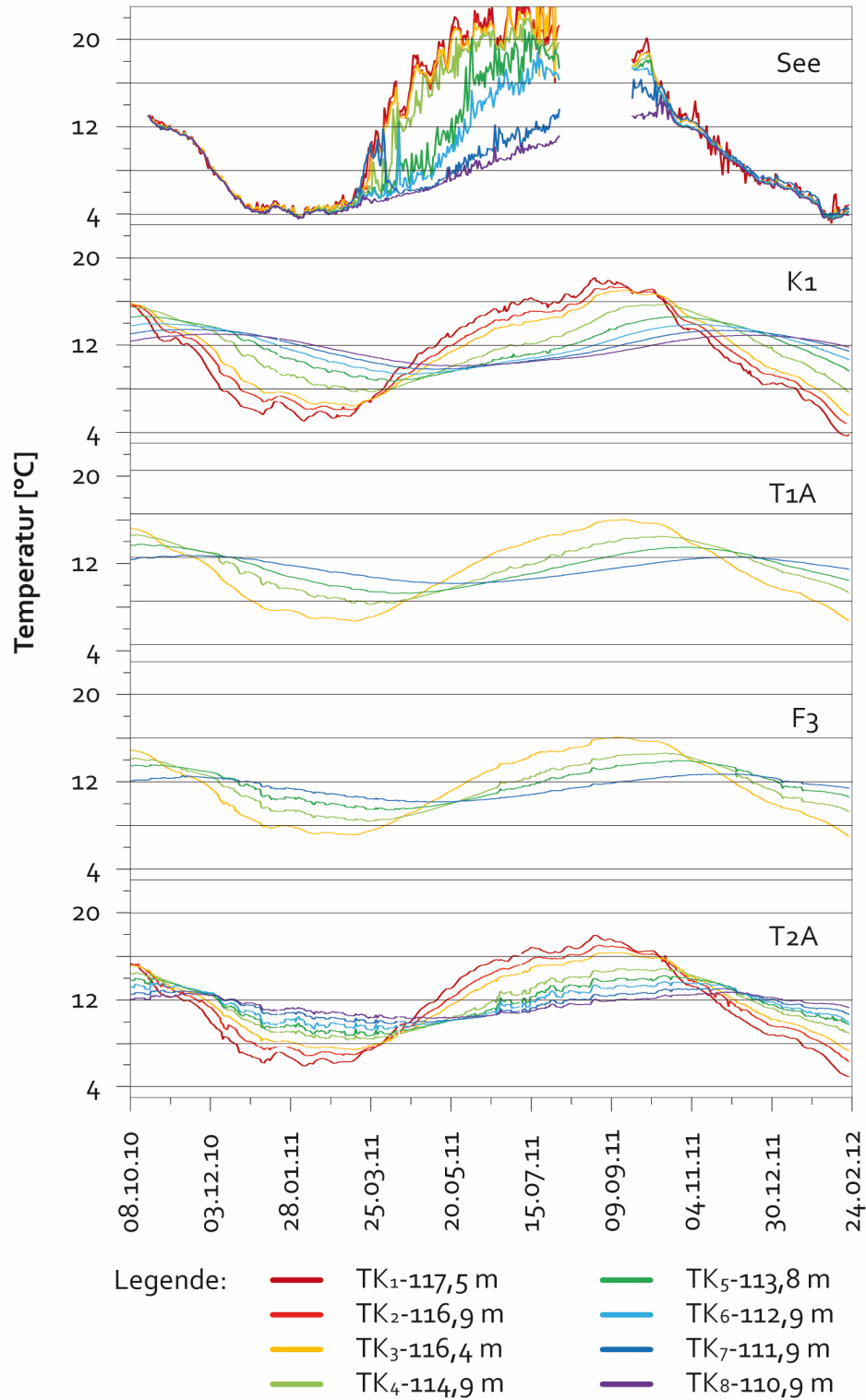


Abb. 27: Temperaturen im See- und Grundwasser in acht verschiedenen Tiefen

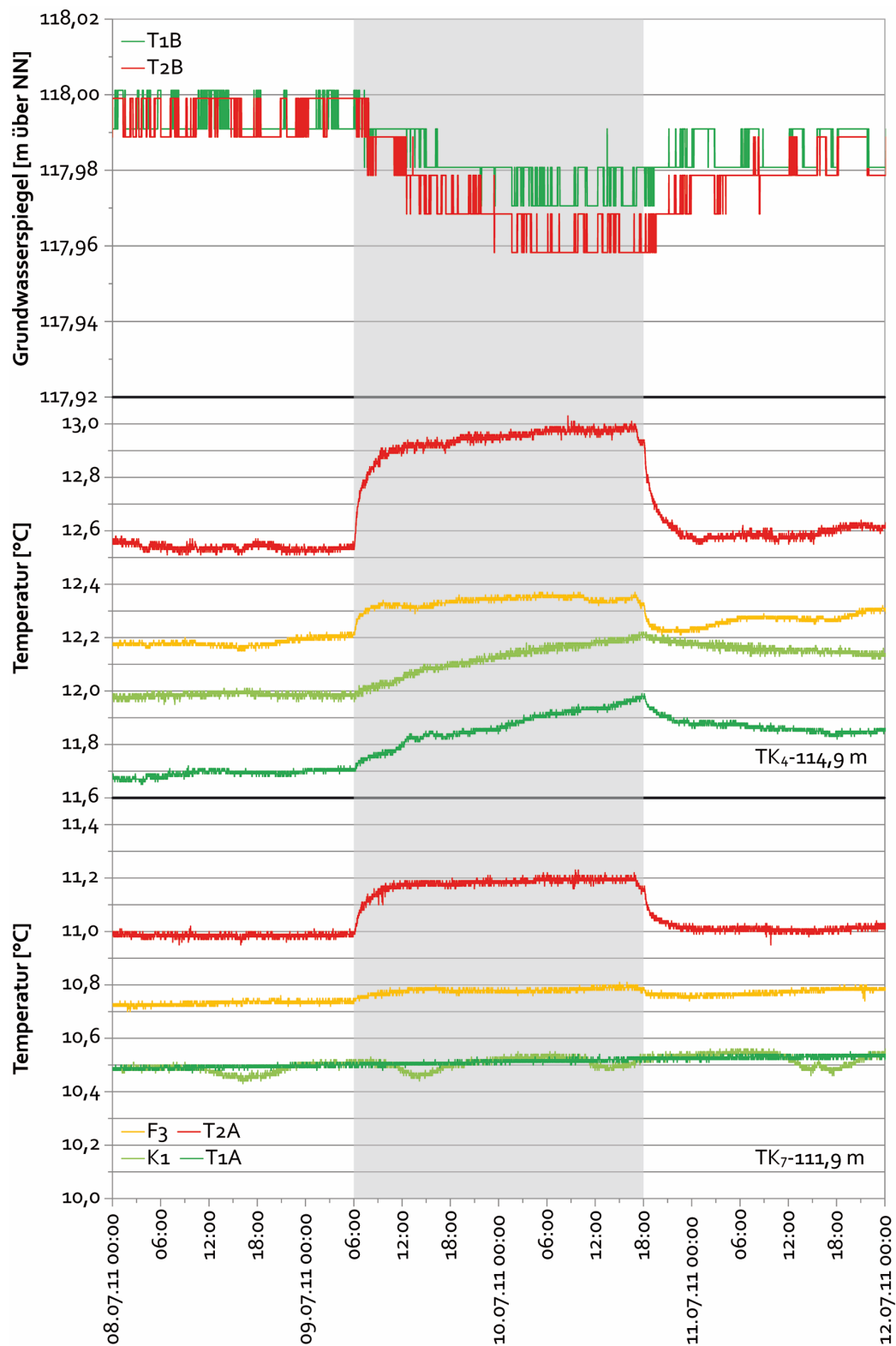


Abb. 28: Grundwasserspiegel und Grundwassertemperaturen in TK₄ und TK₇ während des 36-stündigen Pumpversuches im Brunnen B16 mit einer Pumprate von 110 m³/h

Ein Vergleich von Temperaturmessungen im See mit Temperaturmessungen im Grundwasser zeigte Unterschiede auf, sichtbar in vertikalen Temperaturprofilen (Abb. 29), insbesondere zwischen der seenahen Grundwassermessstelle K1 und der Grundwassermessstelle T2A (55 m entfernt vom See):

Während des Winters beträgt die Seewassertemperatur circa 4 °C und die Grundwassertemperaturen in den Grundwassermessstellen steigen mit zunehmender Tiefe an (Abb. 29, Situation A und B). Im Tiefenbereich 5 m bis 9 m sind die Temperaturen in der Grundwassermessstelle T2A kälter als in der Grundwassermessstelle K1 (Situation A). Zwei Monate später sind die Temperaturen in diesem Bereich abgesunken, der Temperaturunterschied zwischen den Grundwassermessstellen T2A und K1 ist geringer, gleichwohl sind die Temperaturen in der Grundwassermessstelle T2A niedriger als in der Grundwassermessstelle K1 (Situation B).

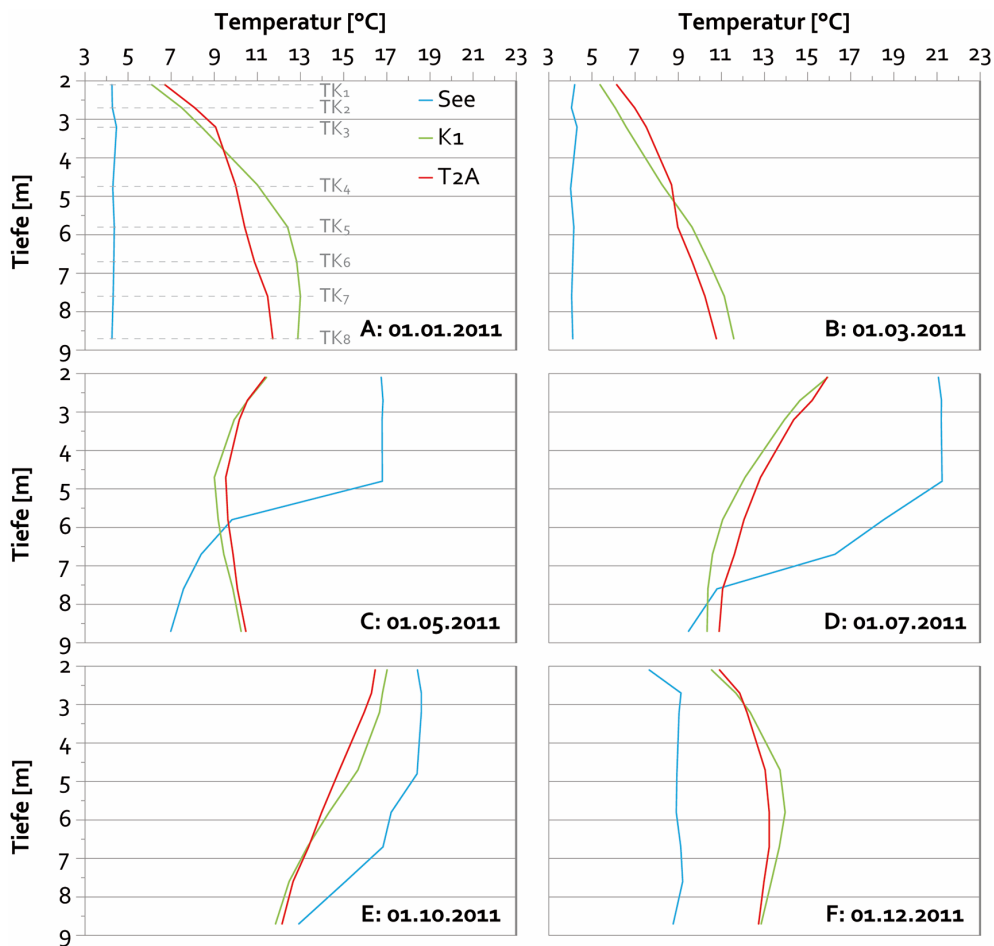


Abb.29: Vertikale Temperaturprofile während eines Jahres (See- und Grundwasser)

Im Mai (Situation C) sind die Seewassertemperaturen auf 17 °C in den oberen 3 m angestiegen. Die Seewassertemperaturen im unteren Tiefenbereich liegen dagegen bei 9 °C in 6 m

Tiefe und bei 7 °C in 8,5 m Tiefe. Die Grundwassertemperaturen in den Grundwassermessstellen K1 und T2A sanken im unteren Tiefenbereich ab und stiegen im oberen Tiefenbereich an. Im Vergleich mit der Grundwassermessstelle K1 sind die Temperaturveränderungen für die Grundwassermessstelle T2A größer im oberen Tiefenbereich und geringer im unteren Tiefenbereich (Situation C und D). Während des Herbstes wird das Seewasser durchmischt (Situation E) und die Seewassertemperaturen sinken (Situation F). In dieser Zeit sinken die Grundwassertemperaturen in der Grundwassermessstelle T2A deutlich schneller als in der Grundwassermessstelle K1.

Die vertikalen Temperaturprofile in den Grundwassermessstellen K1 und T2A sollten annähernd gleich sein, wenn die Grundwassertemperaturen ausschließlich von der Lufttemperatur beeinflusst werden. Abb. 29 zeigt, dass dies nur im oberen Tiefenbereich der Fall ist. Im unteren Tiefenbereich scheinen die Grundwassertemperaturen in der Grundwassermessstelle T2A wärmer zu sein als in der Grundwassermessstelle K1, wenn die Seewassertemperaturen ansteigen. Ferner sind die Grundwassertemperaturen in der Grundwassermessstelle T2A kälter als in der Grundwassermessstelle K1, wenn die Seewassertemperaturen absinken.

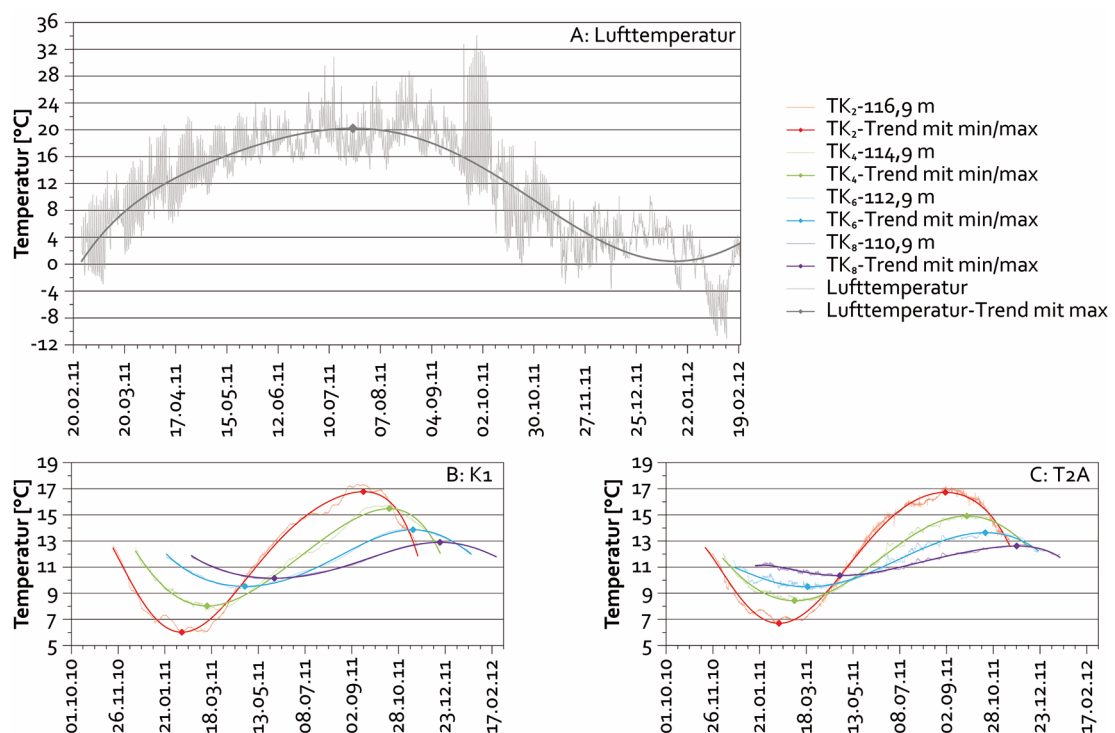


Abb. 30: Temperaturzeitreihen in den Grundwassermessstellen (B und C) verglichen mit der Lufttemperatur (A)

Für einen vertikalen Vergleich der Temperaturzeitreihen in den Grundwassermessstellen K1 und T2A mit der Lufttemperatur wurden die Grundwassertemperaturen der Tiefen TK₂-

116,9 m, TK4-114,9 m, TK6-112,9 m und TK8-110,9 m über NN verwendet (Abb. 30). Die Temperaturzeitreihen in den Grundwassermessstellen K1 und T2A zeigen eine saisonale sinusoidale Variation der Grundwassertemperaturen in jeder Tiefe. Der Einfluss der Lufttemperatur nimmt mit der Tiefe sukzessive ab.

Bezüglich des Temperaturmaximums im Sommer 2011 wurde die Zeitverschiebung zwischen der maximalen Lufttemperatur und der maximalen Grundwassertemperatur analysiert. Wie in Tab. 8 ersichtlich, ist die Zeitverschiebung zwischen Luft- und Grundwassertemperatur länger in K1 als in T2A. Die Unterschiede zwischen den beiden Grundwassermessstellen nehmen von TK2-116,9 m (15 Tage) über TK4-114,9 m (21 Tage) und TK6-112,9 m (27 Tage) zu, dann nehmen sie wieder ab (TK8-110,9 m (22 Tage)).

Tab. 8: Zeitverschiebung zwischen maximaler Lufttemperatur und maximaler Grundwassertemperatur in vier verschiedenen Tiefen der Grundwassermessstellen K1 und T2A, angegeben in Tagen [d]

	Luft – K1 [d]	Luft – T2A [d]
TK2-116,9 m	55	40
TK4-114,9 m	86	65
TK6-112,9 m	115	88
TK8-110,9 m	147	125

Tab. 9: Zeitverschiebung zwischen minimaler Seetemperatur und minimaler Grundwassertemperatur in vier verschiedenen Tiefen der Grundwassermessstellen K1 und T2A, angegeben in Tagen [d]

	See – K1 [d]	See – T2A [d]
TK2-116,9 m	6	9
TK4-114,9 m	37	28
TK6-112,9 m	82	44
TK8-110,9 m	117	82

Für einen horizontalen Vergleich der Temperaturzeitreihen in den Grundwassermessstellen K1 und T2A mit den Seetemperaturen wurden die Grundwassertemperaturen der Tiefen TK2-116,9 m, TK4-114,9 m, TK6-112,9 m und TK8-110,9 m über NN verwendet (Abb. 31). Der Vergleich konzentriert sich auf die minimalen Wassertemperaturen im Winter 2011. Es ist ersichtlich, dass das Seewasser während der Wintermonate durchmischt ist, wobei die minimale Seetemperatur am 4. Februar 2011 erreicht wurde. Generell gibt es eine markante

Zeitverschiebung zwischen der minimalen Seewassertemperatur und der minimalen Grundwassertemperatur in allen Temperaturkanälen in beiden Grundwassermessstellen. Die Unterschiede zwischen den beiden Grundwassermessstellen steigen von TK4-114,9 m (9 Tage) zu TK6-112,9 m (38 Tage) an und nehmen dann zu TK8-110,9 m (35 Tage) ab (Tab. 9).

Die beobachteten hochaufgelösten Grundwassertemperaturen zeigen eine Korrelation zum Pumpbetrieb des Brunnens B16: während der Sommermonate steigen die Temperaturen mit dem Beginn des Pumpbetriebs im Brunnen B16 an und sinken mit dem Ende des Pumpbetriebs ab; während der Wintermonate sinken die Temperaturen mit dem Beginn des Pumpbetriebs im Brunnen B16 ab und steigen mit dem Ende des Pumpbetriebs an. Dieses beobachtete Signal ist wahrscheinlich teilweise auf den Messstellenaufbau zurückzuführen. Die Grundwassermessstelle weist einen Durchmesser von 1 ¼ Zoll auf und besteht über die gesamte Tiefe aus Filterrohren mit einer Schlitzweite von 0,3 mm. Eine Zirkulation des Grundwassers innerhalb der Messstelle kann aufgrund der gemessenen Temperaturverteilung ausgeschlossen werden: die Grundwassertemperaturen sinken während des Sommers mit zunehmender Tiefe ab und steigen im Winter mit zunehmender Tiefe an.

Mit dem Beginn des Pumpversuches im Juli 2011 sinkt der Grundwasserspiegel in den Beobachtungsrohren ab. Aus diesem Grund verschiebt sich das Temperatursignal mit dem Grundwasserspiegel hinunter, während die Sensoren der Temperaturkanäle an ihren Positionen verbleiben. Deshalb steigen mit dem Start des Pumpbetriebes im Brunnen B16 die gemessenen Grundwassertemperaturen im Sommer an und sinken im Winter ab. Mit dem Ende des Pumpbetriebes im Brunnen B16 steigt der Grundwasserspiegel in den Grundwassermessstellen an. Aus diesem Grund verschiebt sich das Temperatursignal mit dem Grundwasserspiegel hinauf, während die Sensoren der Temperaturkanäle an ihren Positionen verbleiben. Mit dem Ende des Pumpbetriebes im Brunnen B16 sinken deshalb die gemessenen Grundwassertemperaturen im Sommer ab und steigen im Winter an.

Die verwendete hochaufgelöste Multilevel-Temperaturmessmethode erwies sich bei kleinen Beträgen und unter Verwendung eines speziellen Messstellenaufbaus sensibel auf schnelle Veränderungen im Wasserspiegel. Die Methode ist daher nützlich, um die unmittelbaren Signale festzustellen, während die Druck-Messfühler nahe am Auflösungsvermögen arbeiteten. So war es möglich, Unterschiede zwischen den Grundwassermessstellen K1 und T2A hervorzuheben. Sowohl in vertikalen Temperaturprofilen als auch in Temperaturzeitreihen konnten, bezüglich der Minima und Maxima von Lufttemperaturen und Seewassertemperaturen, kürzere Verzögerungszeiten in der seefernen Grundwassermessstelle T2A im Vergleich mit der seenahen Grundwassermessstelle K1 festgestellt werden, insbesondere in der Tiefe des Temperaturkanals 6.

Die verwendete Methode ist jedoch in der gegebenen Geländesituation und dem verwendeten Messaufbau nicht als allein stehende Methode einzusetzen, um die Interaktion zwischen Seewasser und Grundwasser zu untersuchen. Zukünftige Studien sollten deshalb weitere Parameter hinzunehmen, zum Beispiel elektrische Leitfähigkeit oder chemische Parameter, um die relevanten Prozesse besser verstehen zu können.

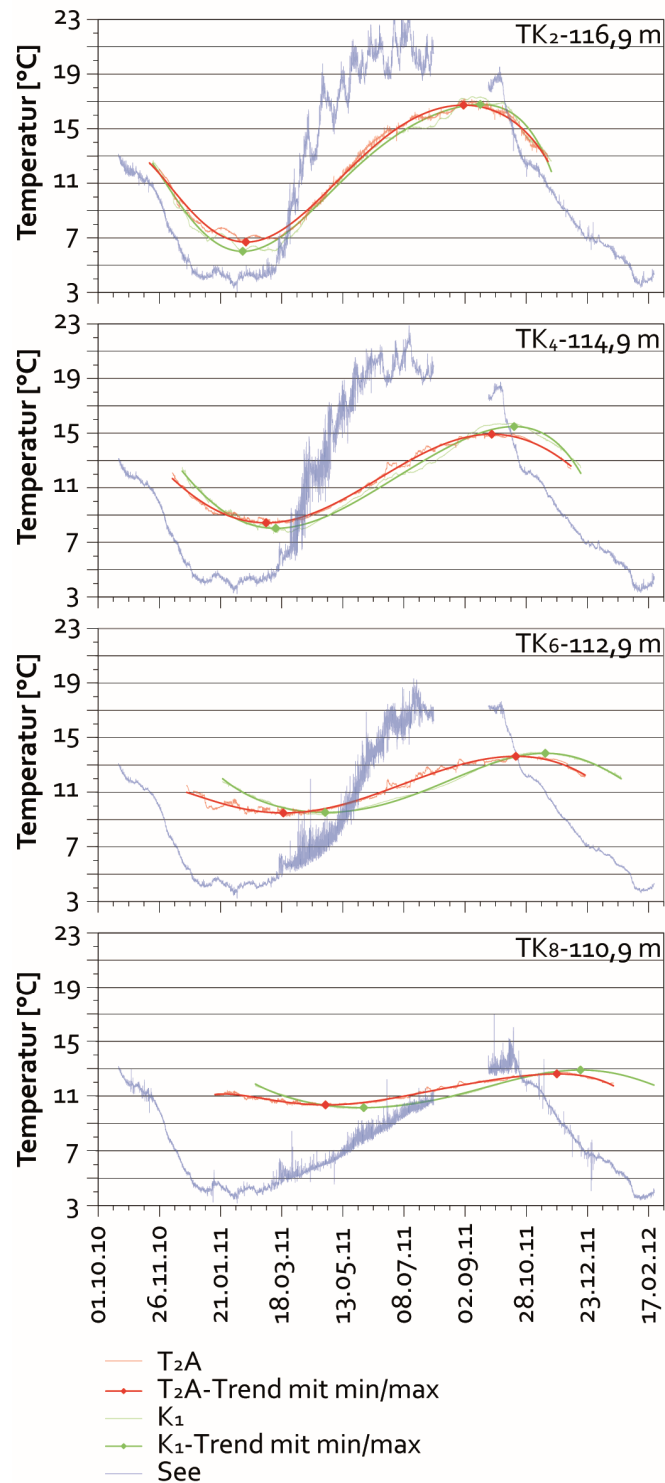


Abb. 31: Temperaturzeitreihen der Tiefen TK2-116,9 m, TK4-114,9 m, TK6-112,9 m und TK8-110,9 m über NN im Vergleich mit Seewassertemperaturen

5.3.3. Markierversuch

Am 13. März 2012 erfolgte die Einspeisung der Markierstoffe in die Grundwassermessstelle T2A (siehe Abb. 6). In den unteren Eingabebereich (110 – 112 m über NN) wurden 2 kg Uranin, in den oberen Eingabebereich (115 – 117 m über NN) 2,5 kg Eosin eingegeben. In den Beobachtungsmessstellen (Brunnen B16 und Doppel-Grundwassermessstelle 50180/50181; siehe Abb. 14) wurden während 244 Versuchstagen 190 Proben entnommen und analysiert (Daten im Anhang, Tab. A5). Im Brunnen B16 handelt es sich um Mischwasser-Proben bei der Brunnen-Filterstrecken, in der Grundwassermessstelle 50180 entstammen die Wasserproben einer Filterstrecke im Bereich der Uranin-Eingabetiefe, während in der Grundwassermessstelle 50181 die Wasserproben aus einer Filterstrecke im Bereich der Eosin-Eingabetiefe kommen.

Die Analysen ergaben für den Brunnen B16 (365 m von T2A entfernt) einen Einzelnachweis am 2. Juli 2012 (111 Tage nach der Markierstoffeingabe) mit einer Uranin-Konzentration von 0,09 µg/l. In der Grundwassermessstelle 50180 (160 m von T2A entfernt) konnte am 2. Juli 2012 (111 Tage nach der Markierstoffeingabe) eine Uranin-Konzentration von 0,05 µg/l nachgewiesen werden. Für die Grundwassermessstelle 50181 (160 m von der Grundwassermessstelle T2A entfernt) gab es keinen Uranin-Nachweis. Während des gesamten Versuches konnte in keiner weiteren Probe Uranin nachgewiesen werden. Der Markierstoff Eosin ließ sich weder in den Grundwassermessstellen noch im Brunnen B16 nachweisen.

Bei beiden uraninhaltigen Proben handelt es sich sicher um Uranin, weil mit einem 0,45 µm-Spritzenfilter vorfiltriert wurde und man bei vorfiltrierten Proben davon ausgeht, dass nur fluoreszierende Substanzen ein Messsignal erzeugen können. Einen möglichen Fehler bei der Probenahme oder bei der Messung im Labor schließen die beteiligten Personen aus.

Dieses Ergebnis lässt sich dahin interpretieren, dass man annimmt (A), es liege kein Probenahme-/Messfehler vor oder (B), es liege ein Probenahme-/Messfehler vor. Im Fall von Variante (A) bliebe zu erklären, warum in keinen weiteren Proben Uranin angetroffen wurde und wieso der Markierstoff gleichzeitig in 205 m voneinander entfernten Messstellen anzutreffen ist: Für den Brunnen B16 könnte angenommen werden, dass eine zu klein gewählte Uranin-Eingabemenge ursächlich für das Fehlen weiterer Uranin-Nachweise ist. Um die vom Wasserwerk gewünschte Maximalkonzentration von 1 mg/m³ im Brunnen B16 nicht zu überschreiten, wäre demnach eine zu kleine Eingabemenge gewählt worden. Für die Grundwassermessstelle 50180 könnte ein Fehlen weiterer Urannachweise auf den Weg des Markierstoffes von der Eingabestelle zum Brunnen B16 zurückzuführen sein, der die Grundwassermessstelle 50180 vermutlich nur am Rande getroffen hat. Für die Grundwassermessstelle 50181 ist anzumerken, dass sich der Filterabschnitt dieser Messstelle annähernd 3 m oberhalb des Filterabschnittes der Grundwassermessstelle 50180 befindet. Deren Filterabschnitt stimmt mit der Eingabetiefe des Markierstoffes Uranin überein. Das gleichzeitige Auftreten des Markierstoffes Uranin im Brunnen B16 und in der Grundwassermessstelle 50180 würde bedeuten, dass die Markierstofffahne mindestens eine Länge von 205 m aufweisen müsste.

Im Fall von Variante (B) müsste aufgrund der geringen Uranin-Konzentration in den beiden positiven Proben sowie des gleichzeitigen Uranin-Auftretens in der Grundwassermessstelle 50180 und im Brunnen B16 (205 m voneinander entfernt) dennoch von einem fehlerhaften Signal unbekannter Ursache ausgegangen werden. Demnach bliebe zu vermuten, dass der Markierstoff länger als 244 Tage benötigt, um von der Eingabestelle zum Brunnen B16 zu gelangen.

Beide Varianten sind mit zahlreichen Annahmen und Vermutungen verbunden. Aufgrund dieses nicht eindeutigen Ergebnisses des durchgeführten Markerversuches kann keine klare Aussage getroffen und das Markerversuchsergebnis nicht weiterverwendet werden.

5.4. Geologisches Basismodell

Das entwickelte geologische Modell für den Raum Babenhausen erstreckt sich über eine Fläche von 120 km² (Abb. 32). Es umfasst vier geologische Schichtflächen – vom Liegenden zum Hangenden – die Basis Oligozän, die Basis Pliozän, die Basis T1-T5-Terrasse und die Basis T6-T7-Terrasse (geologische Karten der modellierten Schichtflächen siehe Anhang Abb. A1 bis Abb. A4).

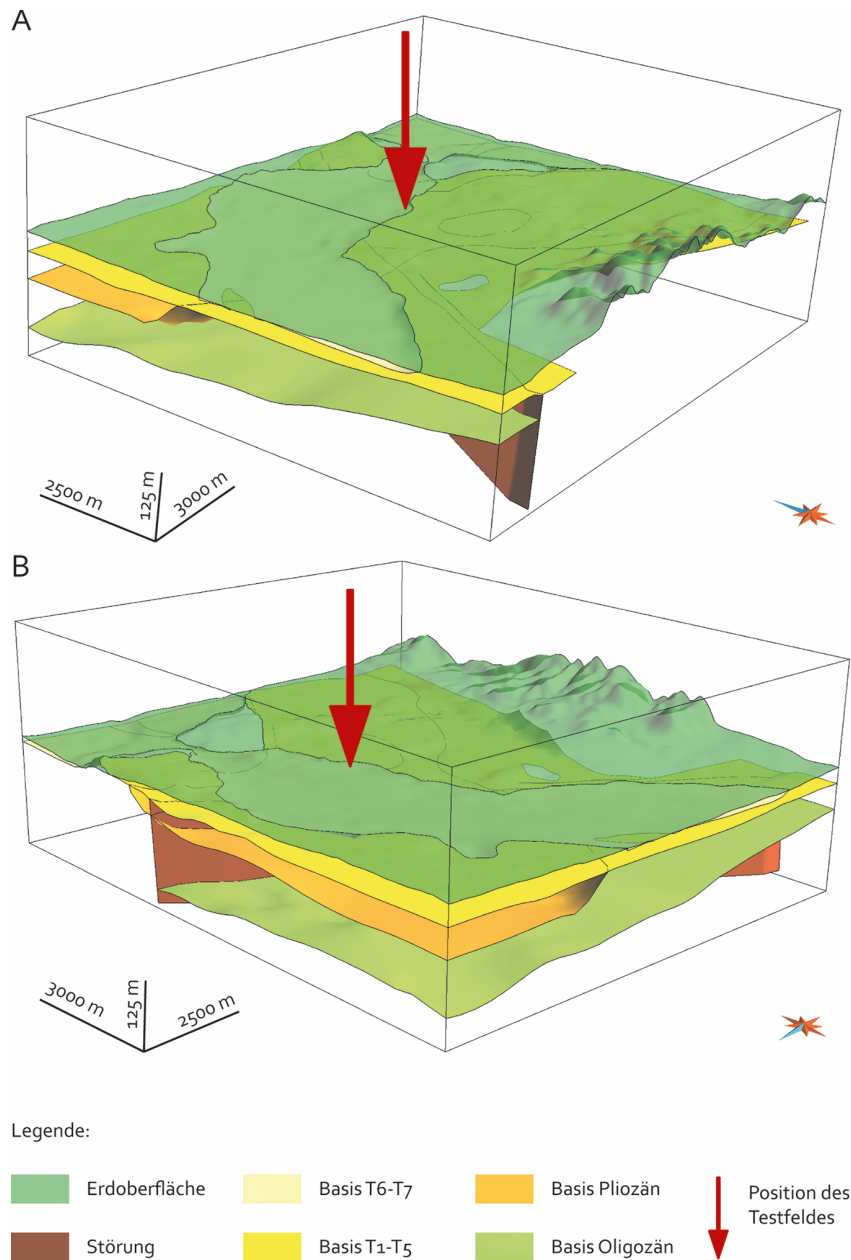


Abb. 32: Räumliche Darstellung des Basismodells (A – die Blickrichtung ist aus Südwest, B – die Blickrichtung ist aus Nordwest; Darstellung 10-fach überhöht)

Die volumetrische Darstellung veranschaulicht die fünf modellierten geologischen Einheiten des Basismodells vom Liegenden zum Hangenden: prä-paläogene Gesteine, Oligozän-Miozän, Pliozän, T1-T5-Terrasse, T6-T7-Terrasse (Abb. 33).

Anhand der prä-paläogenen Gesteine (Variszisches Grundgebirge der Mitteldeutschen Kristallzone und der diskordant auflagernden Schichtenfolge vom Oberen Rotliegend bis zum Buntsandstein) lässt sich das Basismodell strukturell in zwei Hauptschollen gliedern (Abb. 33A). Im Westen des Gebietes befindet sich die Hanau-Seligenstädter Senke, im Osten die Stockstadt/Großumstädter Scholle. Die beiden Hauptschollen werden von einer NNE – SSW verlaufenden und nach Westen einfallenden Störung voneinander getrennt. Diese Störung wird im folgenden Randverwerfung der Stockstadt/Großumstädter Scholle genannt.

Oligozäne-miozäne Schichten treten im Westen des Basismodells auf (Abb. 33B, Anhang Abb. A4). Gegen Osten werden die Schichten durch die Randverwerfung der Stockstadt/Großumstädter Scholle abgegrenzt. Die Basis der oligozänen Sedimente steigt von Norden (50 m unter NN) nach Süden (60 m über NN) an.

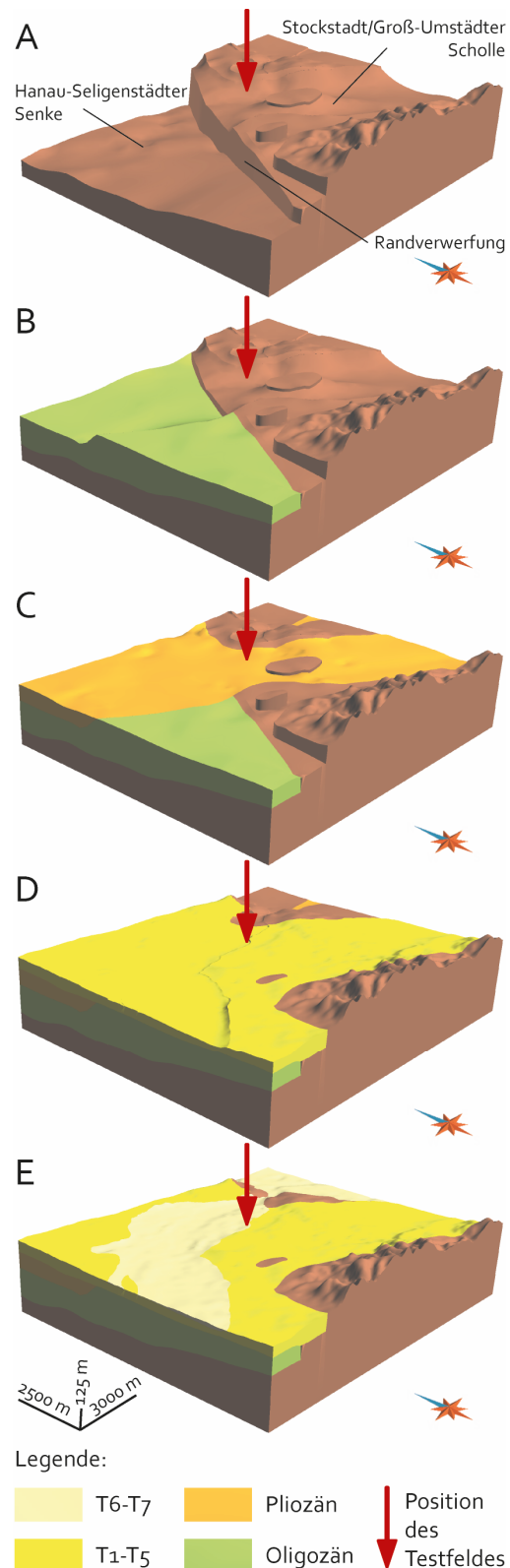


Abb. 33: Volumetrische Darstellung des Basismodells (Blickrichtung aus Südwest, Darstellung: 10-fach überhöht)

Die Sedimente des Pliozäns treten in einer NW – SE verlaufenden Rinne auf (Abb. 33C, Anhang Abb. A3). Der Höhenunterschied zwischen dem Rinnenrand und dem Rinnenzentrum beträgt circa 45 m. Die pliozäne Rinne steht, genau wie die Schichten des Oligozäns, unter dem Einfluss der Randverwerfung der Stockstadt/Groß-Umstädter Scholle. Im Zentrum der Rinnenstruktur beträgt der Versatz der pliozänen Sedimente an der Randverwerfung zwischen 20 m und 30 m. Im Bereich des Testfeldes teilt sich die Rinnenstruktur in zwei Rinnenarme auf. Die Sedimente lagern sich an eine Erhebung des variszischen Grundgebirges an.

Die Ablagerungen der T1-T5-Terrasse sind im Gebiet des Basismodells weit verbreitet (Abb. 33D, Anhang Abb. A2). Sie gehören zu einer NW – SE verlaufenden Rinne. Der Höhenunterschied zwischen dem Rinnenrand und dem Rinnenzentrum beträgt circa 30 m. Am südöstlichen Modellrand fehlen pleistozäne Ablagerungen. Hier tritt das variszische Grundgebirge sowie Einheiten der diskordant auflagernden Schichtenfolge vom Oberen Rotliegend bis zum Buntsandstein zu Tage.

Die Sedimente der T6-T7-Terrasse lagern in einer SW – NE verlaufenden Rinne (Abb. 33E, Anhang Abb. A1). Der Höhenunterschied zwischen dem Rinnenrand und dem Rinnenzentrum beträgt circa 10 m bis 15 m. Am westlichen Modellrand befindet sich eine Erhebung aus unter- bis mittelpleistozänen Ablagerungen, welche die oberpleistozänen Sedimente in zwei Rinnen aufteilt. Im Nordosten des Basismodells geht die Rinne über eine schmale Verbindung in eine NW – SE verlaufende Rinne über.

5.5. Geologisches Detailmodell

Beim geologischen Detailmodell handelt es sich um ein auf Zellen basierendes volumetrisches Modell. Es erstreckt sich über eine Fläche von 2500 m x 2850 m mit variabler Mächtigkeit (Abb. 4). Seine Geometrien ergeben sich aus dem zentralen Bereich des entwickelten geologischen Basismodells (Erläuterungen zur Methodik siehe Kapitel 4.6).

Im Detailmodell wurden die ermittelten Durchlässigkeitsbeiwerte verteilt. Diese Verteilung des Parameters „Durchlässigkeitsbeiwert“ bildet die Grundlage für das Grundwasserströmungsmodell, welches auf dem zentralen Bereich des Detailmodells beruht.

5.5.1. Volumen-Grid

Das Detailmodell besteht aus 100 Zellen in X-Richtung und 114 Zellen in Y-Richtung. Das entspricht einer Zellgröße von 25 m x 25 m (Abb. 34). Die 37 Zellen in Z-Richtung weisen für jede Modell-Einheit eine unterschiedliche Mächtigkeit auf, innerhalb einer Einheit ist die Mächtigkeit weitestgehend konstant. In einer Zell-Säule liegen die Eckpunkte einer Zelle immer senkrecht übereinander. Dadurch weisen die Zellen einer Zell-Säule die gleichen X-, Y-Koordinaten auf, während die Z-Koordinaten variieren.

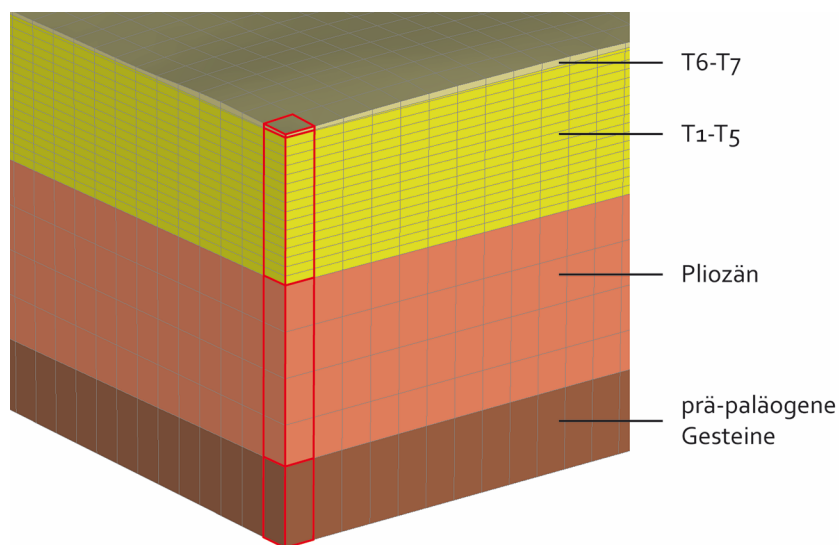


Abb. 34: Aufbau des Volumen-Grids (Flow-Model) über die vier Modell-Einheiten (Darstellung 5-fach überhöht)

Das Detailmodell setzt sich aus vier geologischen Einheiten zusammen. Im Liegenden befinden sich die prä-paläogenen Gesteine (Abb. 35D). Darüber folgt zunächst eine maximal circa 36 m mächtige pliozäne Einheit (Abb. 35C). Die von WNW nach ESE verlaufende und zunächst circa 3350 m breite Rinnenstruktur teilt sich an einer Erhebung prä-paläogener Gesteine in zwei Rinnenstrukturen auf. Beide Einheiten werden flächenhaft von der maximal circa 44 m mächtigen T₁-T₅-Terrasse überlagert (Abb. 35B). Im nördlichen Bereich des Detailmodells wird die T₁-T₅-Terrasse von der Einheit der geringmächtigen T₆-T₇-Terrasse überlagert (maximal 4 m).

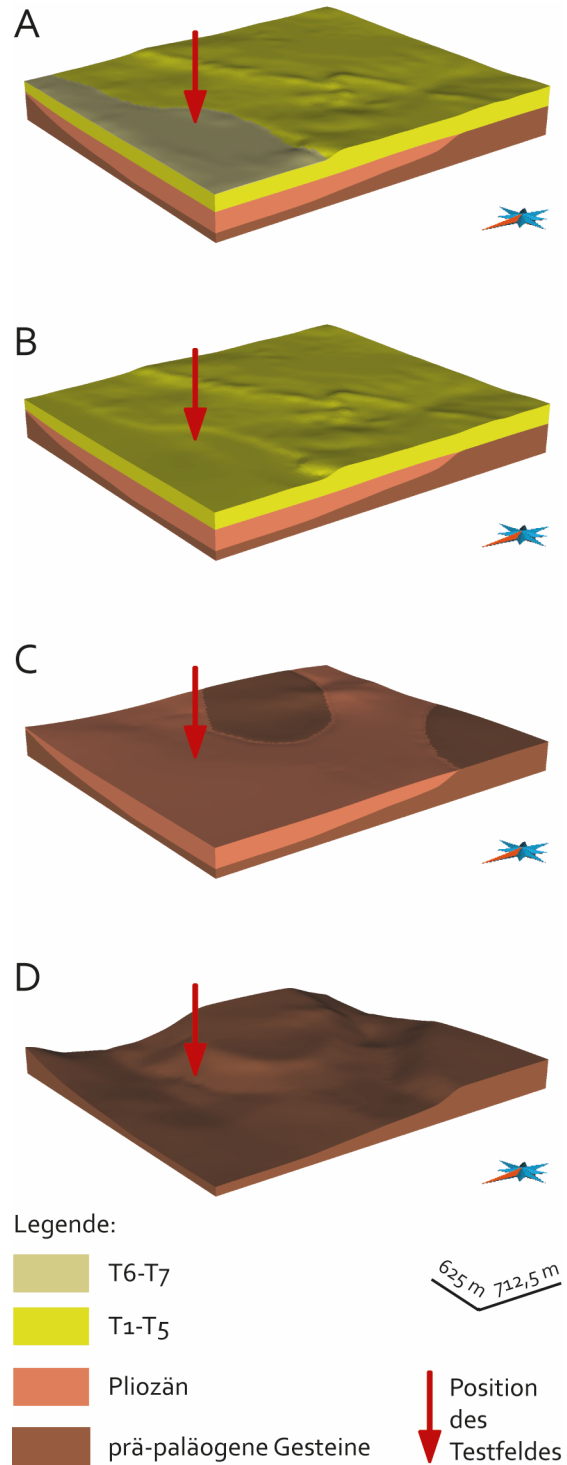


Abb. 35: Geologische Einheiten im Volumen-Grid vom Liegenden zum Hangenden (Blickrichtung aus Nordwest; Darstellung 5-fach überhöht)

5.5.2. Verteilung der Durchlässigkeitsbeiwerte im Raum

Um zunächst einen Einblick in die horizontale und vertikale Verteilung der durch Gelände- und Laborarbeiten bestimmten Durchlässigkeitsbeiwerte zu erhalten, wurden die Durchlässigkeitsbeiwerte entsprechend ihrer Zugehörigkeit zu den geologischen Einheiten in ihrer vertikalen und horizontalen Verteilung dargestellt (Abb. 36). Dabei ist die Verbreitung der geologischen Einheit jeweils durch eine graue Fläche dargestellt, Kreise markieren die Bohrlokation und die Farbfüllung der Kreise gibt prozentual die Datenverfügbarkeit an dieser Position über die gesamte Mächtigkeit in dieser geologischen Einheit an:

Für die T6-T7-Terrasse liegen Bohrungen vor, die maximal drei Schichtbeschreibungen innerhalb dieser geologischen Einheit aufweisen. Aus diesem Grund wird allen Bohrlokationen mit 3 Durchlässigkeitsbeiwerten für die T6-T7-Terrasse eine sehr gute Datenverfügbarkeit (in diesem Fall 100%) zugeordnet. Im Brunnen B16 (Lage außerhalb der T6-T7-Terrasse) liegen keine Schichtbeschreibungen für die T6-T7-Terrasse vor, was zu einer prozentualen Datenverfügbarkeit von 0 % (sehr schlecht) führt. Für die T1-T5-Terrasse liegen im Brunnen B16 22 Schichtbeschreibungen vor. Maximal weist eine Bohrung der T1-T5-Terrasse 25 Schichtbeschreibungen innerhalb dieser geologischen Einheit auf. Dementsprechend kann dem Brunnen B16 eine prozentuale Datenverfügbarkeit von 88 % (sehr gut) zugeordnet werden.

Für die T6-T7-Terrasse liegen insgesamt 26 Durchlässigkeitsbeiwerte im Raum vor. Die horizontale Datenverteilung in der geringmächtigen T6-T7-Terrasse ist gleichmäßig und zeigt drei sehr gute, vier gute und vier mittlere Datenverfügbarkeiten.

Für T1-T5-Terrasse liegen insgesamt 624 Durchlässigkeitsbeiwerte vor. Es liegen fast flächendeckend Daten vor. Ein Bereich im Südosten des Grundwassersmodells fällt auf, in dem keine Bohrungen und somit auch keine Durchlässigkeitsbeiwerte vorhanden sind (³⁵00250-³⁵01000 | ⁵⁵35125-⁵⁵35750). Für die T1-T5-Terrasse ist die räumliche Datenverteilung am besten gegeben.

Für das Pliozän liegen insgesamt 81 Durchlässigkeitsbeiwerte vor. In einer Bohrung gibt es maximal 18 Schichtbeschreibungen innerhalb dieser geologischen Einheit. Im Brunnen B16 liegen 18 Schichtbeschreibungen vor, was zu einer prozentualen Datenverfügbarkeit von 100 % (sehr gut) führt. Für das Pliozän liegen, auf das Volumen der geologischen Einheit bezogen, die wenigsten Datensätze vor. Es ist ersichtlich, dass an vier Bohrlokationen eine gute bis sehr gute vertikale Datenverfügbarkeit vorhanden ist. An fünf weiteren Bohrlokationen liegt eine schlechte Datenverfügbarkeit vor.

Im südöstlichen Abschnitt des Pliozäns gibt es einen Bereich ohne Bohrungen und dementsprechend ohne Daten, weshalb das Detailmodell in diesen Bereichen weniger verlässlich ist.

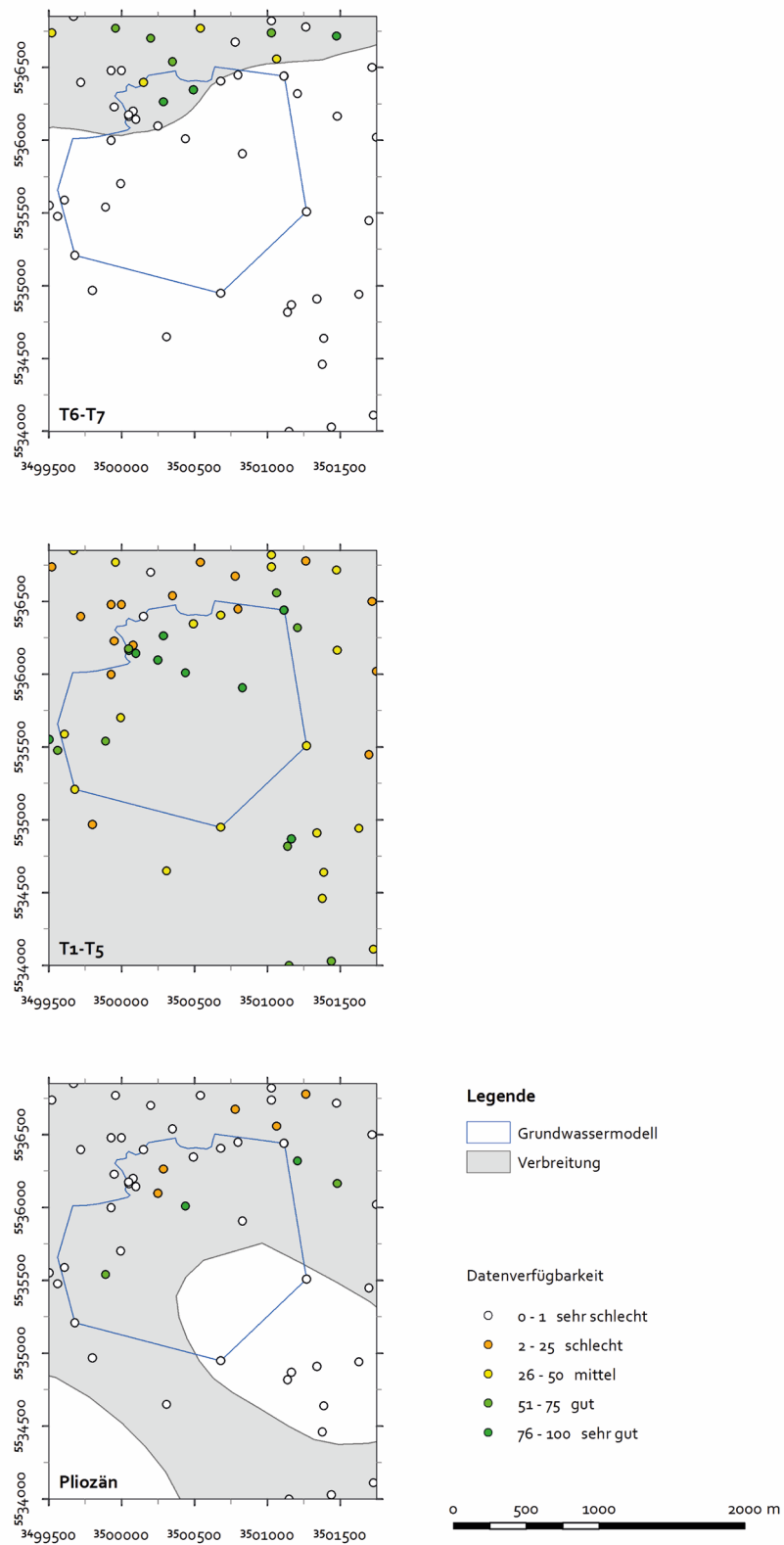


Abb. 36: Verfügbarkeit an Durchlässigkeitsbeiwerten (prozentual) in den verschiedenen geologischen Modelleinheiten des Detailmodells

5.5.3. Verteilung der Durchlässigkeitsbeiwerte im Detailmodell

Die Durchlässigkeitsbeiwerte im Volumen-Grid weisen in den drei geologischen Einheiten Pliozän, T1-T5-Terrasse und T6-T7-Terrasse einen Mittelwert von $5,89 \cdot 10^{-4}$ m/s auf, weshalb die räumliche Darstellung des Detailmodells mehrheitlich von grünen Farbtönen geprägt ist (Abb. 37). Die Einheit prä-paläogene Gesteine zeigt einen einheitlichen und sehr gering angenommenen Durchlässigkeitsbeiwert (Abb. 37D). In der pliozänen Einheit fällt ein Bereich mit sehr hohen Durchlässigkeitsbeiwerten auf. Dieser Bereich befindet sich im Nordwesten des Modells und verläuft in einem circa 450 m breiten Band von Norden nach Westen (Abb. 37C). Die darüber lagernde T1-T5-Terrasse weist im südlichen Abschnitt oberflächennah geringe Durchlässigkeitsbeiwerte auf, während im nördlichen Abschnitt kleinere Bereiche mit höheren Durchlässigkeitsbeiwerten auftreten (Abb. 37B). Dieser Bereich wird von der T6-T7-Terrasse überlagert, die oberflächennah ebenfalls geringe Durchlässigkeitsbeiwerte aufweist (Abb. 37A).

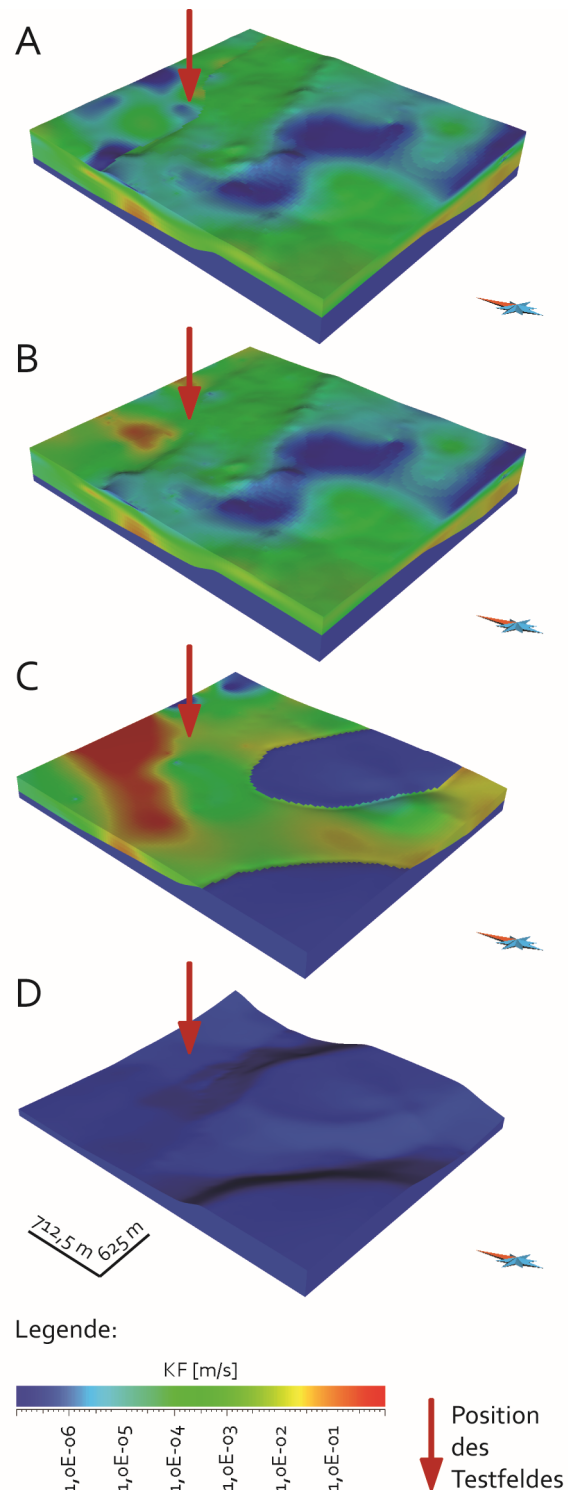


Abb. 37: Durchlässigkeitsbeiwerte im Volumen-Grid für die geologischen Einheiten vom Liegenden zum Hangenden (D – prä-paläogene Gesteine, C – Pliozän, B – T1-T5-Terrasse, A – T6-T7-Terrasse; Blickrichtung aus Südwest; Darstellung 5-fach überhöht)

5.6. Grundwasserströmungsmodell

Das instationäre Grundwasserströmungsmodell erstreckt sich vom 1. Januar 2011 bis zum 24. Juli 2012 über einen Zeitraum von 13680 Stunden und besteht aus insgesamt 37 Layern.

5.6.1. Räumliche Verteilung der Durchlässigkeitsbeiwerte

Die aus dem geologischen Detailmodell übertragenen Durchlässigkeitsbeiwerte bilden die Basis beim Aufbau des Grundwasserströmungsmodells. Es wurden drei Modelle mit unterschiedlichen Verteilungen des Durchlässigkeitsbeiwertes entwickelt (Abb. 38; siehe auch Tab. 1 und Kapitel 4.7). In Modell 1 mit variablen Durchlässigkeitsbeiwerten beruhen die Durchlässigkeitsbeiwerte innerhalb einer geologischen Einheit (T6-T7-Terrasse, T1-T5-Terrasse und Pliozän) jeweils auf Werten, die dieser Einheit zugeordnet werden können. Dadurch kommt es an den Grenzen dieser geologischen Einheiten zu abrupten Wechseln von Durchlässigkeitsbeiwerten. Das Modell 2 weist oberhalb der Modellbasis, die als sehr schlecht durchlässig definiert wurde, einen Einheitswert von $2,53 \cdot 10^{-3} \text{ m/s}$ auf, wobei dieser Wert dem Ergebnis des Pumpversuches im Brunnen B16 entspricht. Im Modell 3 handelt es sich um layerbasierte Durchlässigkeitsbeiwert-Zonen mit einer 5 Klassen-Einteilung. Die Zonen basieren auf den Durchlässigkeitsbeiwerten von Modell 1.

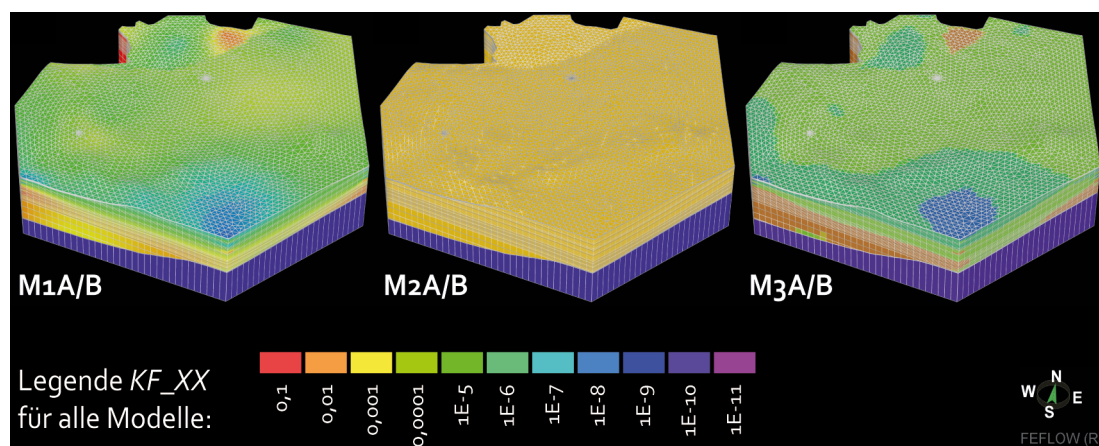


Abb. 38: Die Modellvarianten mit ihrer KF -Verteilung im räumlichen Überblick (Blickrichtung aus Südwest)

Bereits in der räumlichen Darstellung der drei Modellvarianten (Abb. 38), sind die Unterschiede offensichtlich. Hervorzuheben ist, dass im zonierten Modell 3 Bereiche zu erkennen sind, in denen die Durchlässigkeitsbeiwerte höher respektive niedriger sind als an gleicher Position im variablen Modell 1. Zudem fallen die scharfen Grenzen zwischen den Durchlässigkeitsbeiwert-Klassen des Modells 3 im Gegensatz zu den kontinuierlichen Übergängen

(innerhalb einer geologischen Einheit) im Modell 1 auf. Diese Unterschiede sind in der 2-dimensionalen horizontalen Darstellung, beispielhaft am Layer 25, noch deutlicher zu erkennen (Abb. 39): am westlichen Modellrand ist der Durchlässigkeitsbeiwert im Modell 1 höher als im Modell 3 und dieser wiederum höher als im Modell 2. Zugleich ist im Bereich um den Brunnen B16 im Modell 3 durch die Zonierung mit einem Durchlässigkeitsbeiwert als im Modell 1 versehen.

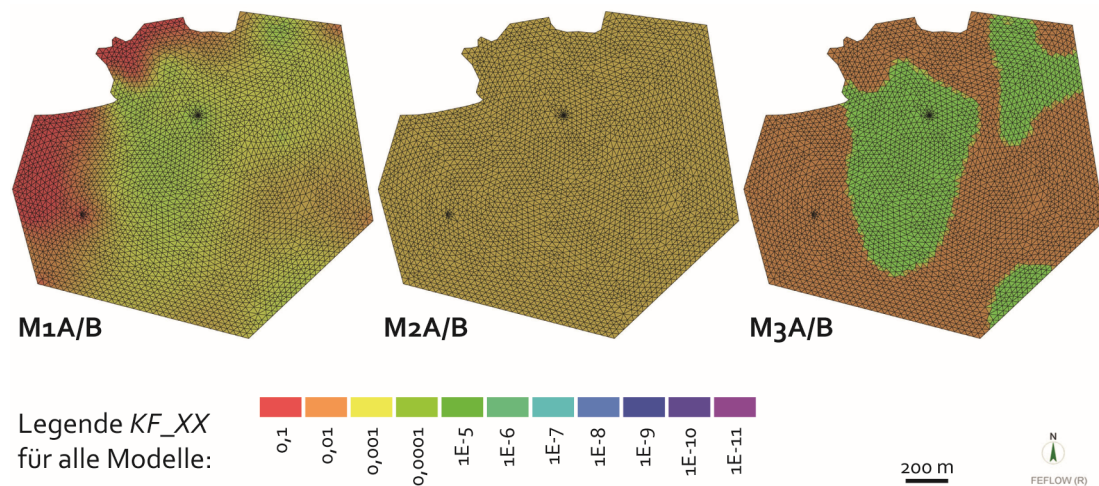


Abb. 39: Die Modellvarianten mit ihrer KF-Verteilung im Layer 25

Um die Unterschiede zwischen den Modellvarianten auch in einer 2-dimensionalen vertikalen Darstellung betrachten zu können, sei hier beispielhaft ein NW – SE Schnitt durch die Grundwassermessstellen T2B, 50180, Brunnen B16 und 50042 sowie ein W – E Schnitt durch die Grundwassermessstellen 50072, 50180, 50160, 50162 und 50164 aufgezeigt (Abb. 40, Abb. 41 und Abb. 42).

In den Abbildungen 41 und 42 ist in Modellvariante M2A/B ein einheitlicher Durchlässigkeitsbeiwert über der Modellbasis zu erkennen. In Modellvariante M1A/B und Modellvariante M3A/B lassen sich sehr gut die Auswirkungen von Interpolation und Zonierung erkennen: Modellvariante M1A/B zeigt eine große Variabilität an Durchlässigkeitsbeiwerten mit mehrheitlich fließenden Übergängen. Im Gegensatz dazu sind in Modellvariante M3A/B Übergänge als Resultat der Zonen-Einteilung deutlich erkennbar. Durch diese Zonen werden Durchlässigkeitsbeiwerte der Modellvariante M1A/B in der Modellvariante M3A/B verringert respektive vergrößert.

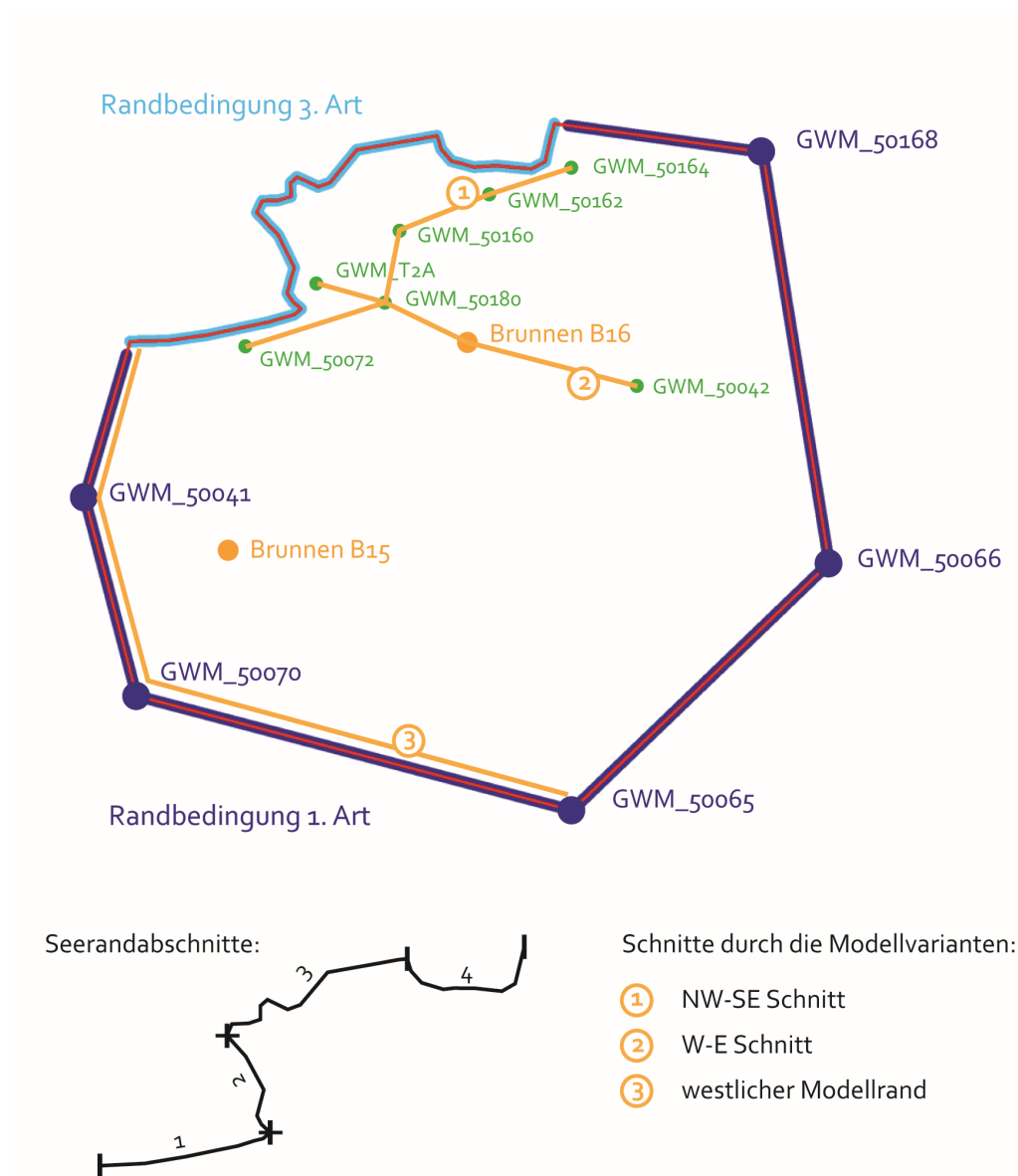


Abb. 40: Lage der Schnitte durch die Grundwassermessstellen im Modellgebiet sowie Lage der Seerandabschnitte

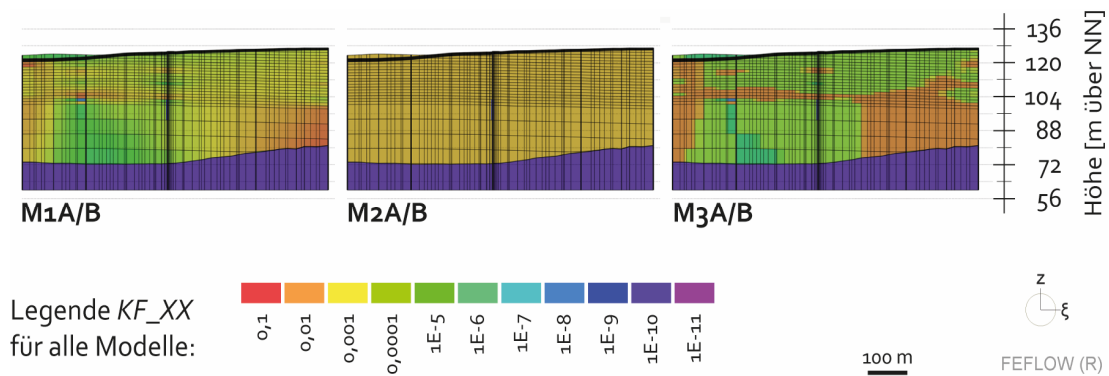


Abb. 41: Die Modellvarianten mit ihrer KF -Verteilung im NW – SE Schnitt

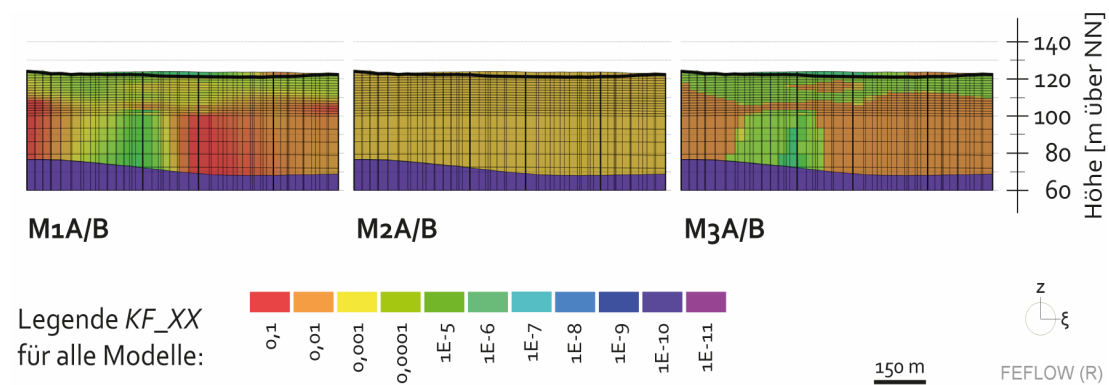


Abb. 42: Die Modellvarianten mit ihrer KF -Verteilung im W – E Schnitt

Ein Schnitt durch den Brunnen B16 verdeutlicht dies nochmals (Abb. 43). Im Bereich um den Brunnen B16 weist die Modellvariante M2A/B den höchsten Durchlässigkeitsbeiwert auf, während die Zonierung in Modellvariante M3A/B diesmal zu einer geringfügigen Erhöhung des Durchlässigkeitsbeiwertes aus Modellvariante M1A/B führt. Der dunkelblau eingefärbte Bereich in Abb. 43 entspricht dem Bereich des Vollrohrs zwischen der oberen Filterstrecke und der unteren Filterstrecke des Brunnen B16, der mit einem Wert von $1,0 \cdot 10^{-9} \text{ m/s}$ definiert wurde.

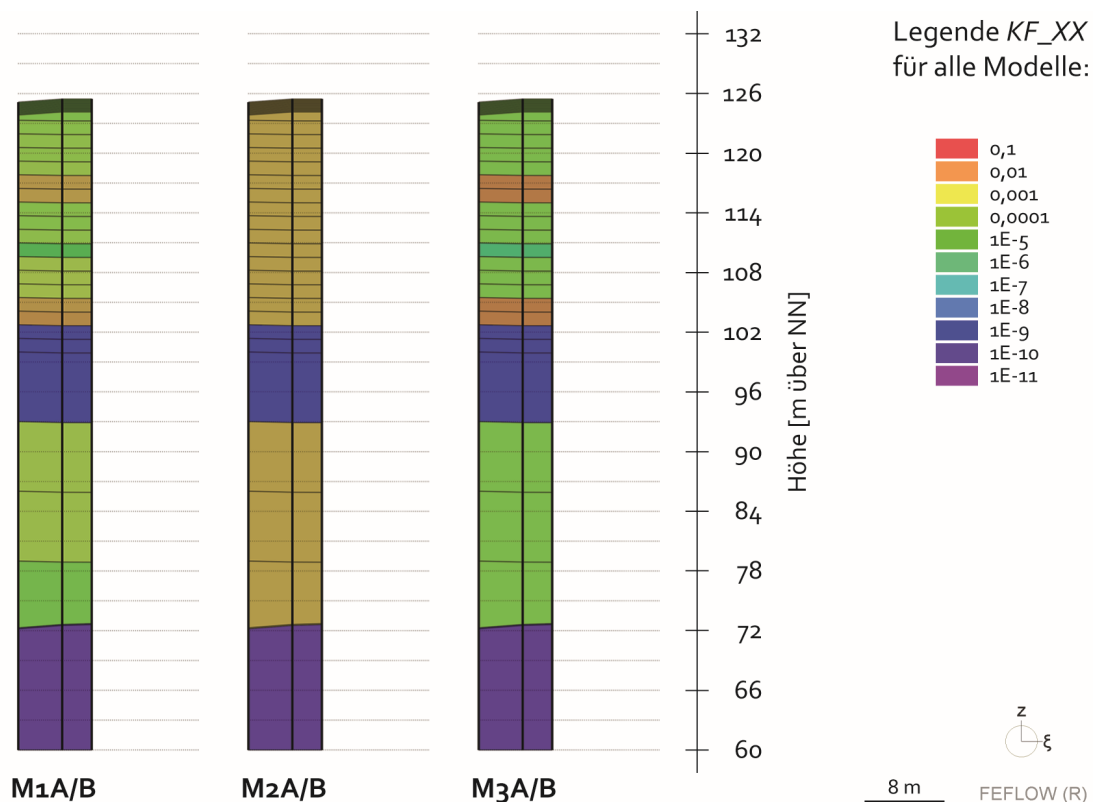


Abb. 43: Die Modellvarianten mit ihrer KF -Verteilung am Brunnen B16 (erster Ring Elemente um den Brunnen)

5.6.2. Abschätzung der Modellqualität

5.6.2.1. Modellzuflüsse und Modellabflüsse

Alle Modelle zeigen nach der anfänglichen Einschwingphase eine ausgeglichene Bilanz (Abb. 44). Die A-Modelle erlauben im Gegensatz zu den B-Modellen einen Zufluss über den Seerand in das Modell hinein sowie einen Abfluss über den Seerand aus dem Modell heraus (Randbedingung 3. Art). Dadurch reduziert sich der Zufluss/Abfluss über die verbleibenden Modellränder (Randbedingung 1. Art). Dessen Mengen weichen in den Modellvarianten stark voneinander ab: Modellvarianten M1A/B circa 70000 – 80000 m³/d, Modellvarianten M2A/B circa 5000 – 10000 m³/d, Modellvarianten M3A/B circa 17500 – 22500 m³/d. Diese Unterschiede lassen sich durch die verschiedenen Durchlässigkeitsbeiwerte der Modellvarianten erklären. Hierzu zeigt ein Schnitt entlang des westlichen Modellrandes vom See zu den Grundwassermessstellen 50041, 50070 und 50065, dass umso mehr Wasser in das Modell hineinströmt je höher der Durchlässigkeitsbeiwert am Modellrand ist (Abb. 40 und Abb. 45).

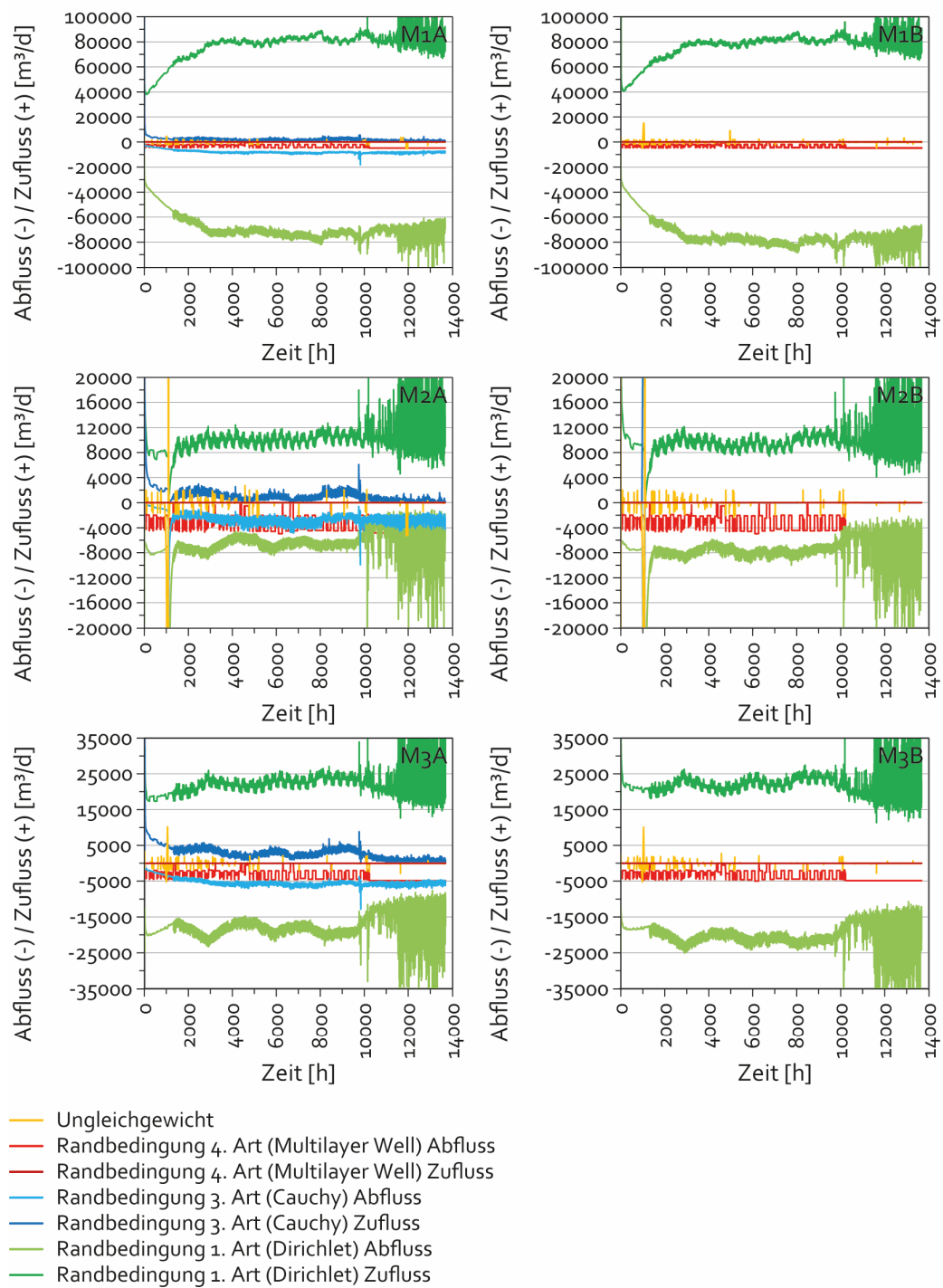


Abb. 44: Vergleich der Modellzuflüsse und Modellabflüsse über die Zeit für die Modellvarianten

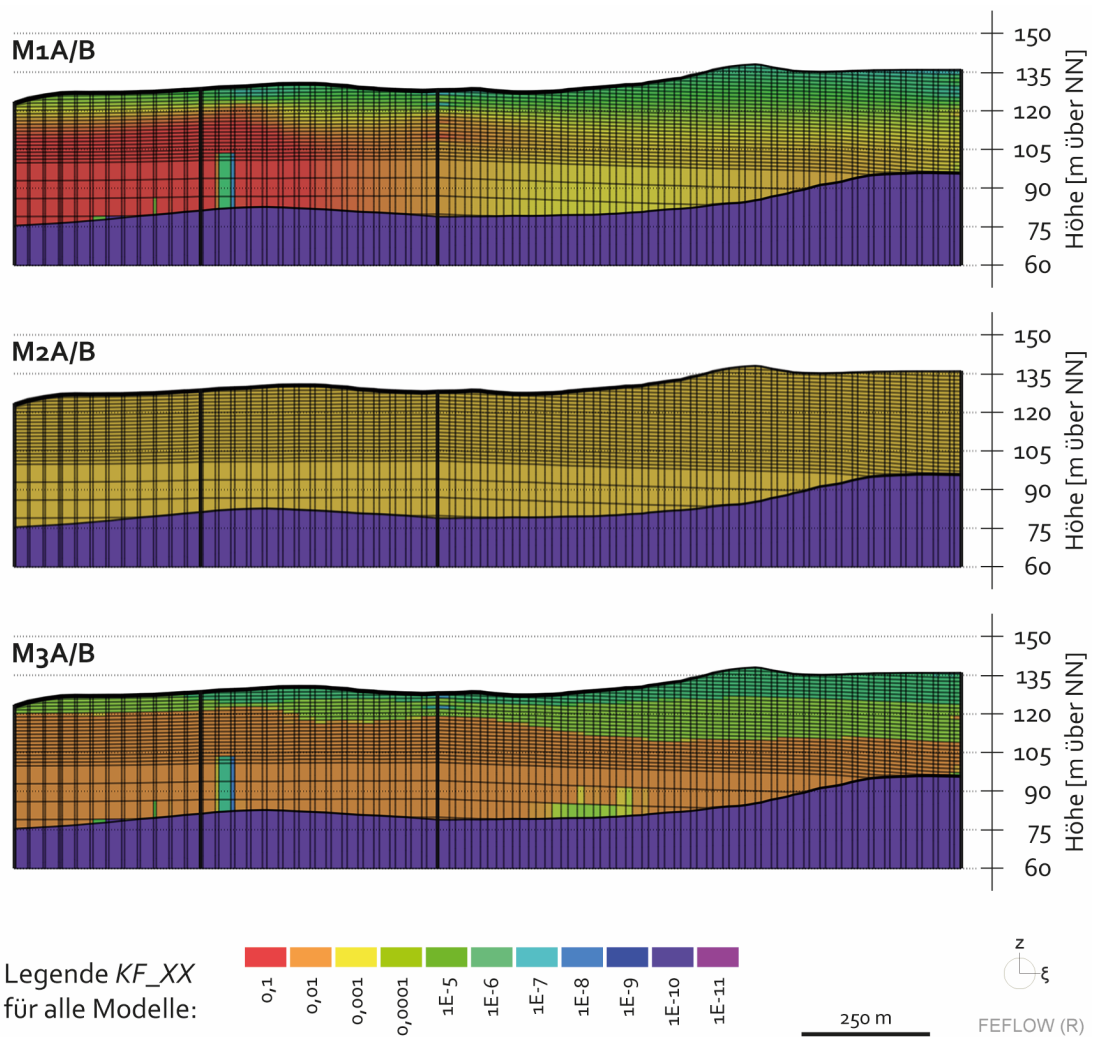


Abb. 45: Die Modellvarianten mit ihrer KF -Verteilung am westlichen Modellrand

5.6.2.2. Beobachtungspunkte

Die berechneten Grundwasserspiegelstände folgen generell den gemessenen Grundwasserspiegelständen. Tendenziell liegen dabei die berechneten Grundwasserspiegelstände geringfügig höher als die gemessenen Grundwasserspiegelstände.

Die Grundwassermessstellen des NW – SE Schnittes (Abb. 40 und Abb. 46) zeigen mit zunehmender Entfernung vom See eine Abnahme seines Einflusses, denn die Unterschiede zwischen den A-Modellvarianten und den B-Modellvarianten werden immer kleiner.

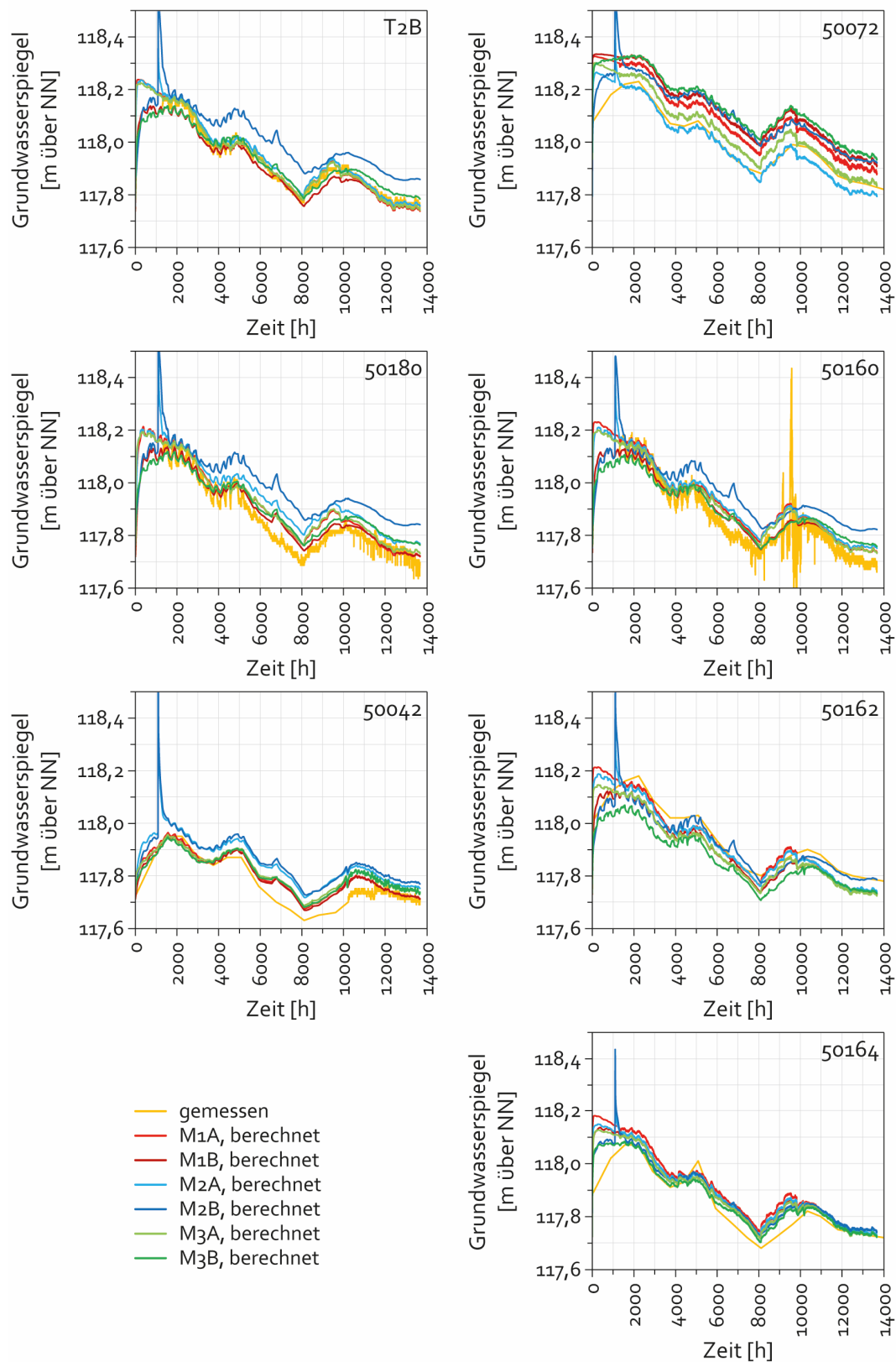


Abb. 46: Vergleich von gemessenen und in sechs Modellvarianten berechneten Grundwasserspiegelständen für verschiedene Beobachtungspunkte

Die Grundwassermessstellen des W – E Schnittes (Abb. 40 und Abb. 46) stehen unter einem starken Einfluss des Sees. Vor allem in den Grundwassermessstellen 50072 und 50162 lässt sich eine deutlich bessere Übereinstimmung der berechneten mit den gemessenen Grundwasserspiegeln für die A-Modellvarianten erkennen. Insgesamt weisen die Modellvarianten M₃A und M₁A die beste Übereinstimmung auf. Der Grundwasserspiegel wird in beiden Fällen um weniger als 10 cm über-/unterschätzt.

Vergleicht man die während des 36-stündigen Pumpversuches im Brunnen B16 aufgezeichneten Grundwasserspiegelstände mit den berechneten Grundwasserspiegelständen der verschiedenen Modellvarianten für die Grundwassermessstellen T2B, 50160 und 50180 (Abb. 47), zeigt sich, dass der berechnete Zeitpunkt der Grundwasserspiegelabsenkung und des Grundwasserspiegelanstieges in allen Modellen gut mit den gemessenen Daten übereinstimmt, lediglich die Amplitude wird nicht ausreichend nachgebildet. Bei der Modellvariante M₂B wird der Grundwasserspiegel um circa 15 cm überschätzt.

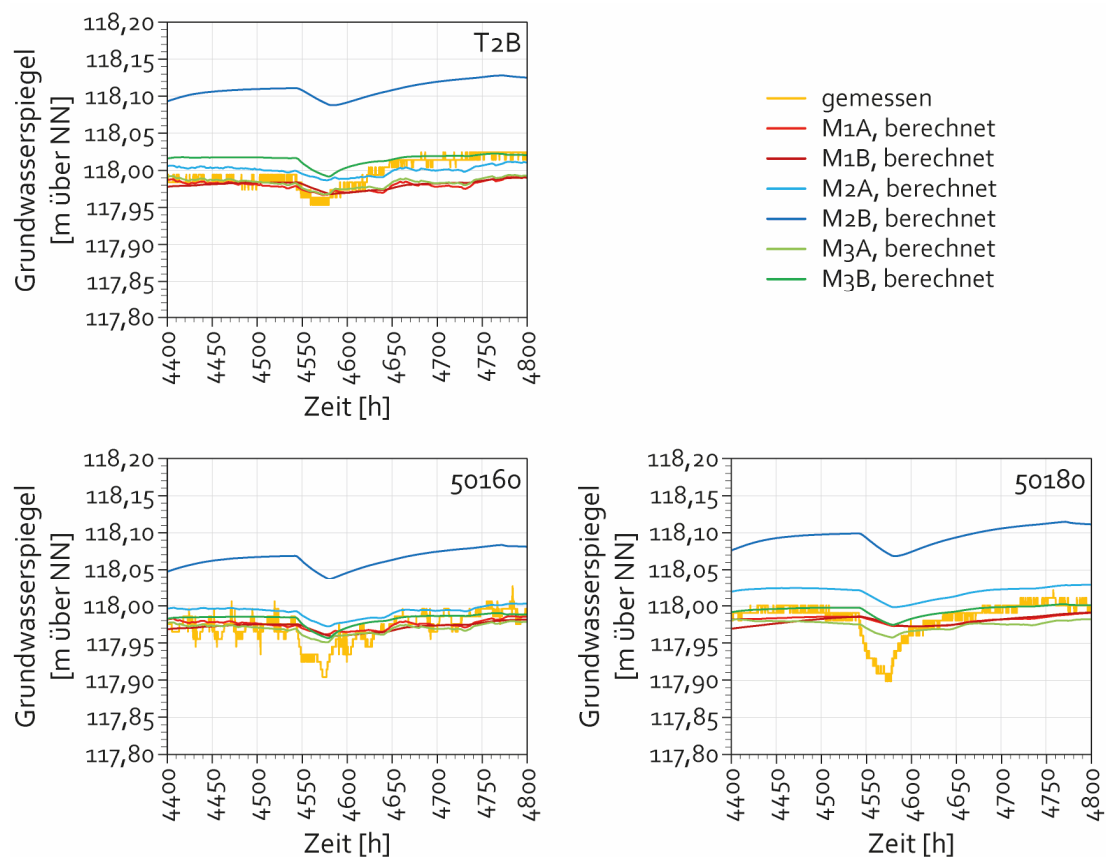


Abb. 47: Gemessene und berechnete Grundwasserspiegelstände in den Grundwassermessstellen T2B, 50160 und 50180 während des Pumpversuches im Brunnen B16

Der Root Mean Square (RMS) für die Beobachtungspunkte im letzten Zeitschritt des Grundwassermodells fällt für alle Modellvarianten verschieden aus (Abb. 48). Die A-Modellvarianten (Seerand gut durchlässig) schneiden mit einem durchschnittlichen RMS von 0,0341 besser ab als die B-Modellvarianten (Seerand schlecht durchlässig) mit einem durchschnittlichen RMS von 0,0584. Außerdem fällt auf, dass insbesondere der Grundwasserspiegel der Grundwassermessstellen 50072 und 50180 stärker davon abhängig ist, ob der Seerand gut durchlässig oder schlecht durchlässig ist. Das zeigt sich dadurch, dass bei den B-Modellvarianten im Vergleich zu den A-Modellvarianten die berechneten Grundwasserspiegelstände dieser Messstellen deutlich höher als die gemessenen Grundwasserspiegelstände sind. Insgesamt betrachtet weist die Modellvariante M₃A den kleinsten RMS mit 0,0311 auf während die Modellvariante M₂B den größten RMS mit 0,0815 zeigt.

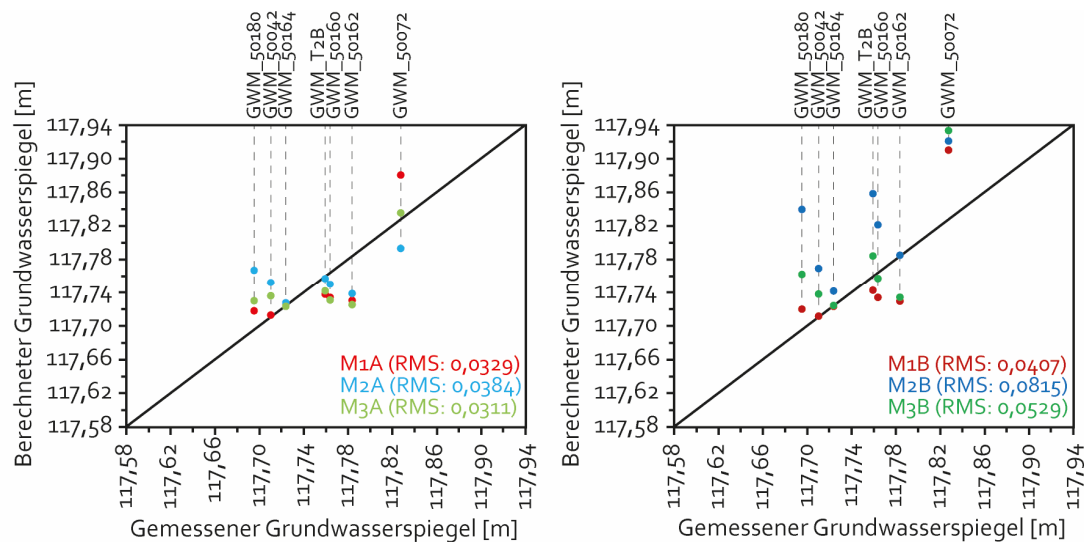


Abb. 48: Vergleich der gemessenen und berechneten Grundwasserspiegelstände für die Beobachtungspunkte im letzten Zeitschritt des Grundwassermodells, separiert nach A-Modellen und B-Modellen mit der Angabe des zugehörigen Root Mean Square (RMS)

5.6.3. Grundwassergleichenpläne im Einflussbereich des Brunnens B16

Die Grundwassergleichenpläne (Abb. 49) der einzelnen Modellvarianten zeigen alle einen regionalen Grundwasserstrom von Südwest nach Nordost. Dennoch unterscheiden sich die Modelle sehr stark im Einflussbereich des Brunnens B16. Es ist eine Abhängigkeit vom Modelltyp bezüglich der Durchlässigkeitsverteilung im Modell (1 – variabel, 2 – uni und 3 – zonen) und der Durchlässigkeit des Seerandes im Modell (A – gut durchlässig und B – schlecht durchlässig) zu erkennen. In jedem Grundwassergleichenplan sind die zugehörigen Strömungslinien zum Brunnen B16 dargestellt, um so den Zustrom zum Brunnen B16 besser visualisieren zu können.

Für die Modellvarianten M1A/B und M3A/B ergibt sich eine Umströmung des Sees nordwestlich des Brunnens B16. In den A-Modellvarianten findet eine Interaktion mit dem See statt: in Modellvariante M1A umfasst diese Interaktion die Seerand-Abschnitte 2, 3 und 4, in Modellvariante M3A die Seerand-Abschnitte 3 und 4 (siehe Abb. 40). Die Modellvarianten M1A/B und M3A/B unterscheiden sich zusätzlich im südlichen Zustrom zum Brunnen B16, denn in Modellvariante M1A/B führt der Hauptpfad einen westlicheren Weg als in Modellvariante M3A/B. Die Modellvarianten M2A und M2B zeigen einen sehr ähnlichen Zustrom zum Brunnen B16 aus Richtung Südwest, östlich des Brunnens B15. Die See-Grundwasser-Interaktion spielt in Modellvariante M2A bezüglich des Zustroms auf den Brunnen B16 eine untergeordnete Rolle.

Für jede Modellvariante konnte der Flow per Layer für den Brunnen B16 ausgelesen werden. Diese Daten geben Auskunft darüber aus welchem Modelllayer oder über welche Filterstrecke der Brunnen B16 das meiste Wasser zieht (Tab. 10).

Damit kommen in der Modellvariante M1A/B 67 % aus der oberen Filterstrecke (OFS) und 33 % aus der unteren Filterstrecke (UFS), in der Modellvariante M2A/B 31 % aus der OFS und 69 % aus der UFS, in der Modellvariante M3A/B 94 % aus der OFS und 6 % aus der UFS. Diese Unterschiede ergeben sich durch die Verteilung der Durchlässigkeitsbeiwerte in den verschiedenen Modellvarianten.

Tab. 10: Flow per Layer für den Brunnen B16 (OFS – Obere Filterstrecke, UFS – Untere Filterstrecke)

Layer	M1A [m³/d]	M1B [m³/d]	M2A [m³/d]	M2B [m³/d]	M3A [m³/d]	M3B [m³/d]
26	77,01	77,00	167,39	168,65	11,17	11,16
27	69,90	69,90	150,86	135,58	9,08	9,93
28	504,37	504,36	150,38	151,52	954,02	953,65
29	705,94	705,94	166,55	167,81	943,16	942,76
Summe OFS	1357,22	1357,21	635,18	623,56	1917,42	1917,50
33	368,43	368,44	765,85	772,03	64,28	64,24
34	312,05	312,05	636,68	642,11	56,01	55,97
Summe UFS	680,48	680,49	1402,52	1414,14	120,28	120,20

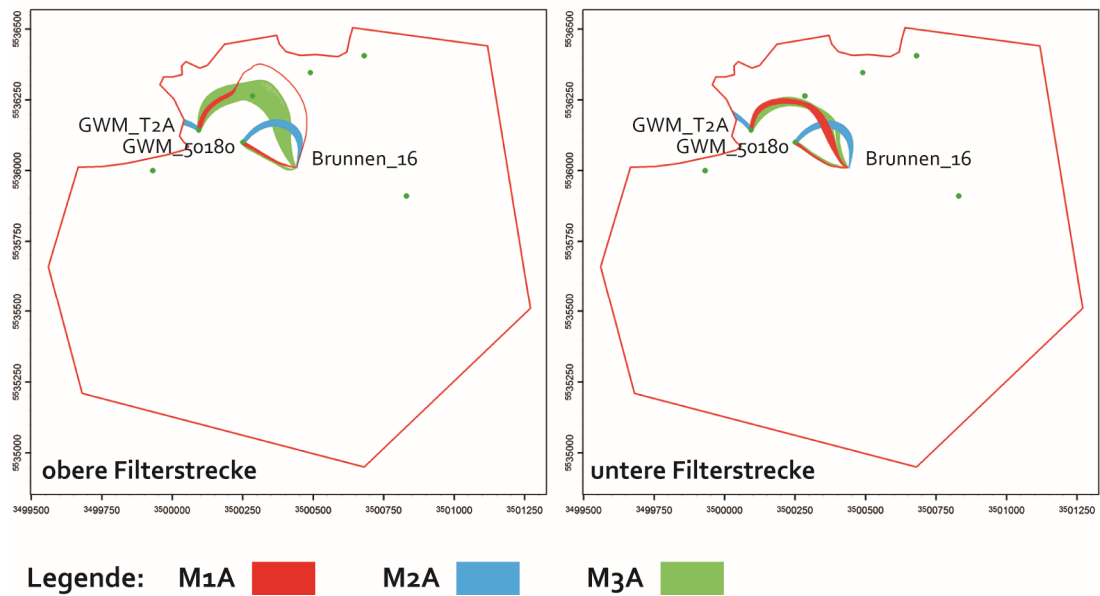


Abb. 50: Strömungslinien (Ausgangspunkt: Grundwassermessstellen T2B und 50180) für den letzten Zeitschritt der Grundwassermodelle M1A, M2A und M3A separiert für die obere Filterstrecke und die untere Filterstrecke

5.6.4. Interaktion zwischen See- und Grundwasser

Die Modellvariante M3A zeigt die beste Übereinstimmung zwischen berechneten und gemessenen Grundwasserspiegelständen (Abb. 46 und Abb. 48). Deshalb wurde für diese Modellvariante der Seerand in vier Abschnitte unterteilt (Abb. 40). Für jeden Seerandabschnitt erfolgte eine Berechnung der Modellzuflüsse und Modellabflüsse (Randbedingung 3. Art), um so Aussagen zur See-Grundwasser-Interaktion treffen zu können (Abb. 51).

Ein abschnittsweiser Vergleich der Modellzuflüsse und Modellabflüsse in der Modellvariante M3A zeigt (Abb. 51), dass über den Abschnitt 1 Grundwasser in den See exfiltriert, während in Abschnitt 4 Seewasser in das Grundwasser infiltriert. Die Abschnitte 2 und 3 bilden den Übergang zwischen beiden Situationen, wobei in Abschnitt 2 noch geringe Mengen an Grundwasser in den See exfiltrieren und in Abschnitt 3 bereits geringe Mengen an Seewasser in das Grundwasser infiltrieren.

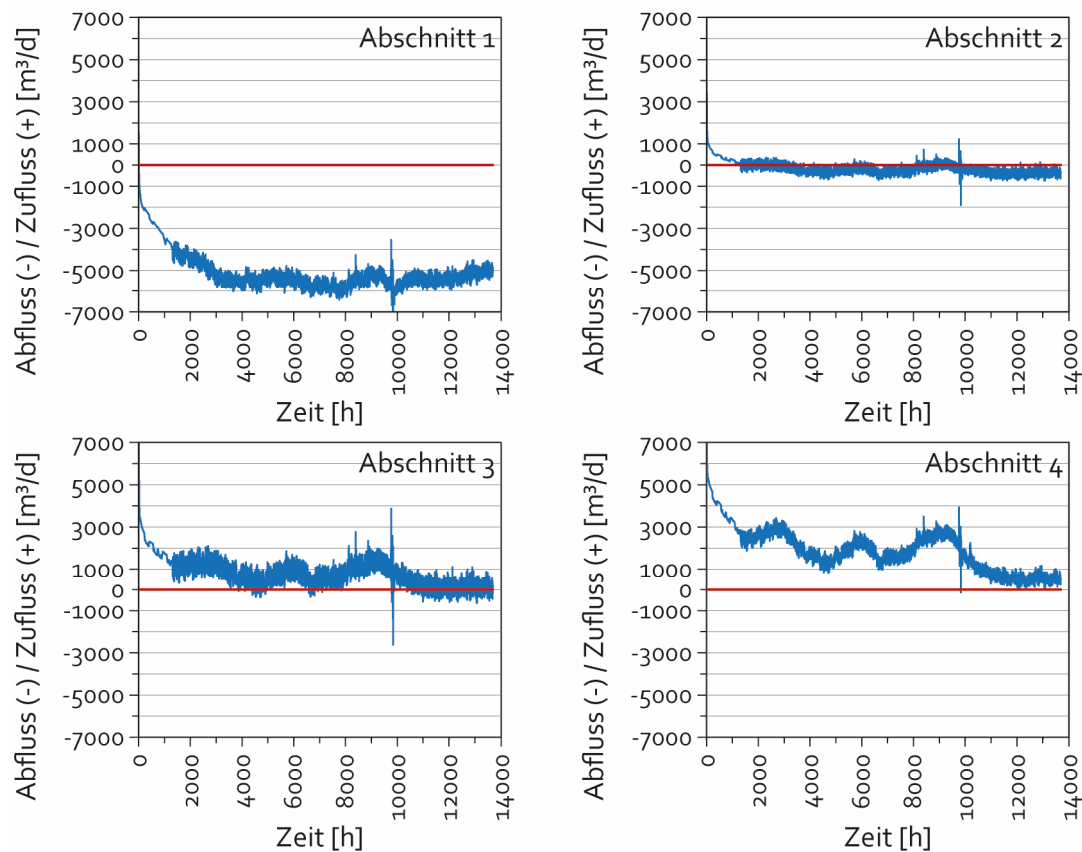


Abb. 51: Zufluss und Abfluss über die vier Seerand-Abschnitte in der Modellvariante M3A

5.6.5. Schlussfolgerungen

Im klassischen Ansatz der Grundwassermodellierung werden ein oder mehrere Parameter des Grundwasserströmungsmodells in einem vorgegebenen Rahmen kalibriert, bis es zu einer annehmbaren Annäherung zwischen berechneten und in Grundwassermessstellen gemessenen Grundwasserständen kommt. Parameter, die kalibriert werden, können zum Beispiel Leakagefaktoren, Randzuflüsse, Transmissivitäten bzw. Durchlässigkeitsbeiwerte und Grundwasserneubildungsraten sein. Einer der wichtigsten zu kalibrierenden Parameter ist jedoch der Durchlässigkeitsbeiwert. Er wird zumeist in einer begrenzten Anzahl an Zonen angegeben, für die ein Minimum und ein Maximum abgeschätzt werden. Innerhalb dieses „Rahmens“ kann der Durchlässigkeitsbeiwert in diesen Zonen kalibriert werden (Schäfer 2016).

Dabei bleibt aber offen, welche Rolle die heterogene Verteilung fluvialer Sedimente bei der Grundwassermodellierung spielen kann. Insbesondere stellt sich die Frage, welchen Einfluss der Detaillierungsgrad der Durchlässigkeitsbeiwerte auf das Grundwasserströmungsmodell

und dabei vor allem auf den berechneten Grundwasserspiegel und die berechneten Fließwege hat. Zur Beantwortung dieser Frage kann die für das Grundwasserströmungsmodell vorgenommene Sensitivitätsanalyse beitragen.

5.6.5.1. Grundwassergleichen und Fließwege

Die Sensitivitätsanalyse bezüglich des Parameters „Durchlässigkeitsbeiwert“ erbrachte drei A-Modelle, deren Seerand durchlässig ist und drei B-Modelle, deren Seerand gering durchlässig ist. Die A-Modelle weisen einen geringeren RMS-Fehler auf als die B-Modelle: die beobachteten Grundwasserspiegelstände stimmen daher besser mit den berechneten Grundwasserspiegelständen überein. Die Grundwasserspiegelhöhen an den Beobachtungsstellen in den A-Modellen sind trotz der unterschiedlichen räumlichen Verteilung der Durchlässigkeitsbeiwerte sehr ähnlich. Dennoch führt die unterschiedliche räumliche Verteilung der Durchlässigkeitsbeiwerte zu unterschiedlichen Fließfeldern und hieraus resultieren deutlich verschiedene Fließwege. Dem Durchlässigkeitsbeiwert kommt daher bei der Grundwassermodellierung eine sehr große Bedeutung zu. Dem sollte bei der Kalibrierung des Parameters „Durchlässigkeitsbeiwert“ Rechnung getragen werden, durch möglichst fundierte Recherche und umfassende Datenerhebung.

5.6.5.2. See-Grundwasser-Interaktion

Für die Modellvariante mit der besten Übereinstimmung zwischen berechneten und gemessenen Grundwasserspiegelständen (M₃A) erfolgte eine Budget-Berechnung an vier Seerand-Abschnitten (Abb. 51). Daraus ergibt sich, dass es von Abschnitt 1 im Westen mit der Situation „Grundwasserexfiltration in den See“ einen Übergang zu Abschnitt 4 im Osten mit der Situation „Infiltration von Seewasser in das Grundwasser“ gibt. In Abschnitt 2, am Testfeld gelegen, exfiltrieren noch geringe Mengen Grundwasser in den See, während in Abschnitt 3 bereits geringe Mengen Seewasser in das Grundwasser infiltrieren.

Im Bereich des Testfeldes entsprechen diese modellierten Zustände den vor Ort gemessenen Wasserspiegelständen. Da der Unterschied zwischen Seewasserspiegel und Grundwasserspiegel sehr klein ist, kann vermutet werden, dass schon bei nur geringen Wasserspiegelländerungen auch über den Abschnitt 2 Seewasser in das Grundwasser infiltriert.

5.6.5.3. Aussagekraft des Grundwassermodells

Das entwickelte Grundwassermodell reicht nicht bis an die Grenzen des Einzugsgebietes heran und wird im Wesentlichen von einem Festpotentialrand begrenzt. Aufgrund der zahlreichen Beeinflussungen durch weitere Brunnen der Wasserversorgung sowie Sand- und Kiesabbau im Arbeitsgebiet wäre ein Grundwassermodell für das gesamte Einzugsgebiet sehr groß geworden und hätte im Vergleich zum Interessengebiet (Brunnen B16 und Testfeld) die Erhebung außerordentlich umfangreicher Datenmengen erfordert. Aus diesem

Grund wurde die Größe des Modells beschränkt und durch hochaufgelöste Grundwasserspiegeldaten fixiert. Dadurch ist das entwickelte Grundwassermodell streng an die verwendeten instationären Daten der Modellränder gebunden und kann nicht auf andere Zeiträume übertragen werden. Außerdem ist es nicht möglich, Szenarien z.B. mit abweichendem Pumpbetrieb zu berechnen. Des Weiteren ermöglicht das Grundwasserströmungsmodell keine Aussagen zur Fließgeschwindigkeit, da der durchgeführte Markierversuch ohne Ergebnis blieb und das Modell dementsprechend nicht auf eine Zeit kalibriert werden konnte.

Das Modell bietet aber die Möglichkeit einer weiteren manuellen Präzisierung der Parameter „Durchlässigkeitsbeiwert“, „Leakage-Faktor“, „Porosität“ und „Speicherkoeffizient“ wenn neue Daten aus Bohrungen, Siebanalysen oder Pumpversuchen gewonnen werden können. Außerdem können Ergebnisse weiterer Interpolationsverfahren zur geologisch sinnvollen Verteilung von Durchlässigkeitsbeiwerten implementiert werden.

Die Aussagen zum Modell beziehen sich auf das Modellzentrum um den Brunnen B16 und das Testfeld. Das Grundwasserströmungsmodell ist sensitiv auf die Durchlässigkeit des Seebodens und die räumliche Verteilung der Durchlässigkeitsbeiwerte. Die A-Modelle mit einem durchlässigen Seerand erweisen sich aufgrund des geringeren RMS-Fehlers als realistischer. Änderungen in Wert und Verteilung der Durchlässigkeitsbeiwerte im Modellinneren führen zwangsläufig zu einer größeren Änderung im Verlauf der Fließwege. Der Grundwasserspiegel bleibt von diesen Änderungen aber im Wesentlichen unberührt.

5.6.5.4. Fazit

Die Sensitivitätsanalyse hinsichtlich des Parameters „Durchlässigkeitsbeiwert“ zeigt, dass bei der Grundwassermodellierung die implementierten Durchlässigkeitsbeiwerte eine große Rolle spielen, da sie einen erheblichen Einfluss auf die Fließwege haben. Werden Durchlässigkeitsbeiwerte aus den lokalen fluvialen Sedimenten gewonnen, zeigt sich, dass auch deren heterogener Verteilung eine große Bedeutung zukommt. Dementsprechend sollte ein Grundwasserströmungsmodell, für ein Gebiet, in dem fluviale Sedimente vorzufinden sind bezüglich der Durchlässigkeitsbeiwerte möglichst detailliert modelliert werden, um der heterogenen Verteilung der fluvialen Sedimente angemessener Rechnung tragen zu können. Der Detailierungsgrad des Modells sollte insbesondere hoch sein, wenn die Kenntnis der Fließwege für das Ergebnis von Bedeutung ist. Der klassische Ansatz der Grundwassermodellierung, bei dem Durchlässigkeitsbeiwerte lediglich in Zonen kalibriert werden, erscheint bei einer hydrogeologischen Situation wie im vorliegenden Arbeitsgebiet nicht ausreichend zu sein, um verlässliche Aussagen über die Fließwege treffen zu können.

6. Zusammenfassung, Schlussfolgerungen und Ausblick

Östlich von Babenhausen wurde zwischen einem Baggersee eines örtlichen Sand- und Kieswerkes und einem 410 m entfernten Brunnen des örtlichen Wasserversorgers ein Testfeld mit 1"- und 1¼"-Grundwassermessstellen errichtet.

Die Sedimente im Testfeld wurden zunächst mittels Georadar untersucht, um einen Eindruck über die Heterogenität der Sedimente im Arbeitsgebiet zu erhalten und charakteristische Sedimentstrukturen sowie deren Dimension zu ermitteln. In 53 Radargrammen (zwischen 29 und 47 m lang, 5 m tief) sind großräumige Strukturen zu erkennen, die größer als der mit Georadar untersuchte Bereich sind und ihn in vier durchschnittlich 1,5 m mächtige horizontale Schichten unterteilen. Innerhalb dieser vier Schichten treten kleinräumige Strukturen auf, wie zugeschüttete Kolklöcher mit Schrägschichtungen, laterale Ablageungselemente und parallel abgelagerte Überflutungssedimente. Die räumliche Ausdehnung der Kolklöcher weist annähernd eine Breite von 10 m und eine Höhe von 0,6 m auf. Rinnenstrukturen, die sich durch den gesamten mit Georadar untersuchten Bereich ziehen, konnten nicht festgestellt werden.

Um charakteristische Durchlässigkeitsbeiwerte zu ermitteln, wurden für 149 Sedimentproben aus dem Arbeitsgebiet Sieb- und Schlämmanalysen durchgeführt und nach Białas und Kleczkowski (1970) ausgewertet. Es ergaben sich hierbei Durchlässigkeitsbeiwerte zwischen $8,2 \cdot 10^{-9}$ und $1,2 \cdot 10^{-3}$ m/s. Zugleich erfolgten auf dem Testfeld Multilevel-Pumpversuche. Die mit diesem Verfahren ermittelten Durchlässigkeitsbeiwerte zeichnen über die Tiefe einen ähnlichen Trendverlauf wie den der Sieb- und Schlämmanalysen, weisen jedoch um eine Größenordnung niedrigere Beträge auf, was eine weitere Präzisierung des Verfahrens erfordert. Insgesamt 808 Durchlässigkeitsbeiwerte, ermittelt aus petrographischen Schichtbeschreibungen in Bohrdatenbanken, ermöglichten eine Ergänzung der mittels Gelände- und Laborarbeiten ermittelten Werte. Außer diesen schichtbezogenen Daten lieferte ein Pumpversuch im Brunnen B16 einen regionalen Durchlässigkeitsbeiwert von $2,45 \cdot 10^{-3}$ m/s.

Basierend auf Messungen des See- und Grundwasserspiegels in Messstellen des Testfeldes kann eine Wasserscheide parallel zum Seeufer, in der Nähe der Grundwassermessstelle T1B vermutet werden. Die Differenz zwischen See- und Grundwasserspiegel lag im Zeitraum der Messungen mindestens bei 4 cm über eine Distanz von 5 m. Im Bereich des Testfeldes lag damit im gesamten Beobachtungszeitraum eine Grundwasserexfiltration in den See vor. Diese Situation bleibt auch unter Beachtung des für die Drucksonden angegebenen Fehlerbandes von maximal 0,1 % FS (entspricht +/- 0,5 cm) bestehen. Die Differenz zwischen See- und Grundwasserspiegel ist dennoch sehr gering. Eine Überwachung des betroffenen Seeabschnittes scheint sinnvoll, da eine Änderung in der Differenz respektive in der Wasserfließrichtung nicht dauerhaft ausgeschlossen werden kann.

Die im Testfeld gemessenen hochaufgelösten tiefenorientierten See- und Grundwassertemperaturen zeigen in Bezug auf die See-Grundwasser-Interaktion kein eindeutiges Bild. Sie erweisen sich als sehr sensibel in Bezug auf geringe, schnell auftretende Grundwasserspiegeländerungen. So konnte ein Pumpversuch, durchgeführt im Brunnen B16, in der

Grundwassermessstelle T1A durch einen Temperaturanstieg um 0,3 °C deutlich erfasst werden, während der Grundwasserspiegel in der Grundwassermessstelle T1B mit einer Absenkung um 2 cm sehr nah an das Auflösungsvermögen der Drucksonde herankam. Um Aussagen zur See-Grundwasser-Interaktion treffen zu können, sollte die Methode der hochauflösenden tiefenorientierten Temperaturmessung daher zukünftig mit weiteren Methoden, z.B. einer Leitfähigkeitsmessung, kombiniert werden.

Ein geologisches Basismodell für den Raum Babenhausen umfasst auf einer Fläche von 120 km² die vier geologischen Schichtflächen Basis Oligozän, Basis Pliozän, Basis T1-T5-Terrasse und Basis T6-T7-Terrasse. Aus seinem Zentrum entstand das zellbasierte geologische Detailmodell über eine Fläche von 2500 x 2850 m. Während die horizontale Zellauflösung für alle geologischen Einheiten gleich ist, richtet sich die vertikale Zellauflösung einer geologischen Einheit nach der Datenverfügbarkeit an Durchlässigkeitsbeiwerten innerhalb dieser Einheit. Die räumliche Verteilung der Durchlässigkeitsbeiwerte im Detailmodell beruht auf insgesamt 916 Werten und erfolgte für jede geologische Einheit separat.

Diese Erkenntnisse aus der geologischen 3D-Modellierung flossen in die Entwicklung eines Grundwasserströmungsmodells ein. Es basiert auf einem räumlichen Detailmodell, welches die Heterogenität der örtlichen Sedimente durch eine hohe horizontale und vertikale Auflösung der Durchlässigkeitsbeiwerte berücksichtigt. Eine Sensitivitätsanalyse bezüglich des Parameters „Durchlässigkeitsbeiwert“ unterscheidet zunächst zwischen Modellvarianten mit gut durchlässigem Seerand und mit schlecht durchlässigem Seerand. Von ihnen schneiden die Modellvarianten mit gut durchlässigem Seerand am besten ab. Weitere Modellvarianten ergaben sich durch variable, einheitliche und zonierte räumliche Verteilungen der Durchlässigkeitsbeiwerte.

Im entwickelten Grundwasserströmungsmodell wird die Geologie des Untergrundes bestmöglich berücksichtigt. Sowohl die horizontale als auch die vertikale Heterogenität der fluvialen Sedimente werden im Grundwasserströmungsmodell in den Modellvarianten M1A/B und M3A/B beachtet. Bereiche mit ähnlichen Durchlässigkeitsbeiwerten (M1A/B) respektive Zonen eines Durchlässigkeitsbeiwertes (M3A/B) umschließen Modellabschnitte mit ähnlichen Durchlässigkeitsbeiwerten layerweise. Modellvariante M2A/B mit einem einheitlichen Durchlässigkeitsbeiwert ist geologisch nicht sinnvoll, da dies bedeuten würde, dass im gesamten Modellgebiet einheitliche Sedimente auftreten. Das ist aber nicht der Fall. Dementsprechend weist die Modellvariante M2A/B auch den größten Unterschied zwischen berechneten und gemessenen Grundwasserspiegeln auf.

Die Modellvariante M3A (Seerand gut durchlässig, Durchlässigkeitsbeiwerte layerweise zoniert) erbrachte die beste Übereinstimmung zwischen den gemessenen und den berechneten Grundwasserspiegelständen. Dabei fließt dem Brunnen B16 mehrheitlich Grundwasser aus südwestlicher Richtung zu. Im Norden des Modells kommt es zu einer Interaktion zwischen dem Baggersee und dem Grundwasser. Über zwei der Seeabschnitte infiltriert Seewasser in das Grundwasser. Die Grundwasserfließzeiten zwischen Baggersee und Brunnen B16 konnten dabei nicht ermittelt werden, da ein durchgeführter Markierversuch ohne

Ergebnis blieb, weshalb das instationäre Grundwasserströmungsmodell auch nicht bezüglich des Parameters „Zeit“ kalibriert werden konnte.

Die durchgeführten Arbeiten zeigen gleichwohl die hohe Bedeutung einer hochaufgelösten Modellierung des Durchlässigkeitsbeiwertes für die Modellierung der Grundwasserströmung. Der Einfluss der Verteilung der Durchlässigkeitsbeiwerte in den Modellen 1 (variabel) und 3 (zoniert) auf die berechneten Grundwasserspiegelstände ist zwar gering, kann aber dennoch zu einem deutlich unterschiedlichen Verlauf der Strömungslinien führen. Gerade der Verlauf der Strömungslinien ist aber von entscheidender Bedeutung, wenn hydrogeologische Aussagen zu konfligierenden Nutzungen von Geo-Ressourcen auf engem Raum getroffen und dabei insbesondere Risikoabschätzungen vorgenommen werden sollen. Für diesen Einsatz der geologischen 3D-Modellierung kommt diesem Ergebnis daher eine hohe praktische Bedeutung zu. Auch wenn die hochaufgelöste Ermittlung von Durchlässigkeitsbeiwerten sehr aufwendig ist, sollten diese möglichst umfangreich in Modellierungen einbezogen werden, um auch Zonierungen auf eine breite Basis stellen zu können. Dies gilt im Besonderen, wenn, wie im untersuchten Fall, verschiedene im Spannungsverhältnis zueinander stehende Raumnutzungen in unmittelbarer Nähe zueinander stattfinden.

Die festgestellte hohe Sensitivität der Fließwege auf die Verteilung der Durchlässigkeitsbeiwerte legt es nahe, für eine weitere Optimierung von Grundwasserströmungsmodellen etwa eine Verknüpfung von Fazies-Einheiten mit Durchlässigkeitsbeiwerten in einem Objekt-Modell zu erproben, um so eine Verbesserung der räumlichen Datenverteilung von Durchlässigkeitsbeiwerten zu erzielen. Die Vorteile einer solchen generischen Objekt-Modellierung wären eine bessere Repräsentation von Geologie und Fließeigenschaften. Auf eine solche Modellierung müsste dann allerdings auch die Datenerhebung angepasst werden.

Literatur

- Anderson, M.P. (2005): Heat as groundwater tracer. *Ground Water* 43 (6): 951–968.
- Arndt, D.; Bär, K.; Fritsche, J.-G.; Kracht, M.; Sass, I. und Hoppe, A. (2011): 3D structural model of the Federal State of Hesse (Germany) for geopotential evaluation. *Zeitschrift der Deutschen Geologischen Gesellschaft für Geowissenschaften* 162 (4): 353–369.
- Bär, I. (1985): Hydrogeologische und geohydraulische Untersuchungen an einem Mainterrassenaquifer bei Seligenstadt (Hessen). *Giessener Geologische Schriften* 39: 1–126.
- Baumgartner, A. und Liebscher, H.-J. (1996): *Allgemeine Hydrologie – Quantitative Hydrologie*, Gebrüder Bornträger Berlin-Stuttgart.
- Brauchler, R.; Hu, R.; Hu, L. und Ptak, T. (2012): Bestimmung von hydraulischen Parametern in Lockergesteinen: Ein Vergleich unterschiedlicher Feldmethoden. *Grundwasser* 17 (2): 57–67
- Beyer, W. (1964): Zur Bestimmung der Wasserdurchlässigkeit von Kiesen und Sanden aus der Kornverteilungskurve. *WWT* 14 (6): 165–168.
- Białas, Z. und Kleczkowski, A. S. (1970): Über den praktischen Gebrauch von einigen empirischen Formeln zur Bestimmung des Durchlässigkeitskoeffizienten k . *Arch. Hydrotech.* 17 (3): 405–417.
- Butscher, C. und Huggenberger, P. (2007): Implications for karst hydrology from 3D geological modeling using the aquifer base gradient approach. *Journal of Hydrology* 342: 184–198.
- Caumon, G.; Collon-Drouaillet, P.; Le Carlier de Veslud, C.; Viseur, S. und Sausse, J. (2009): Surface-Based 3D Modeling of Geological Structures. *Mathematical Geosciences* 41: 927–945.
- Chiang, W.-H. (2005): *3D-Groundwater Modeling with PMWIN – A Simulation System for Modeling Groundwater Flow and Transport Processes*. Springer, Heidelberg.
- Davis, J. L. und Annan, A.P. (1989): Ground-penetrating radar for high-resolution mapping of soil and rock stratigraphy. *Geophysical Prospecting* 37: 531–551.
- Diem, S.; Vogt, T. und Hoehn, E. (2010): Räumliche Charakterisierung der hydraulischen Leitfähigkeit in alluvialen Schotter-Grundwasserleitern: Ein Methodenvergleich. *Grundwasser* 15 (4): 241–251.
- Diersch, H.-J. (2014): *FEFLOW – Finite Modeling of Flow, Mass and Heat Transport in Porous and Fractured Media*. Springer, Heidelberg.
- Dietrich, P., Butler Jr., J. J. und Faiß, K. (2008): A rapid method for hydraulic profiling in unconsolidated formations. *Ground Water* 46 (2): 323–328.

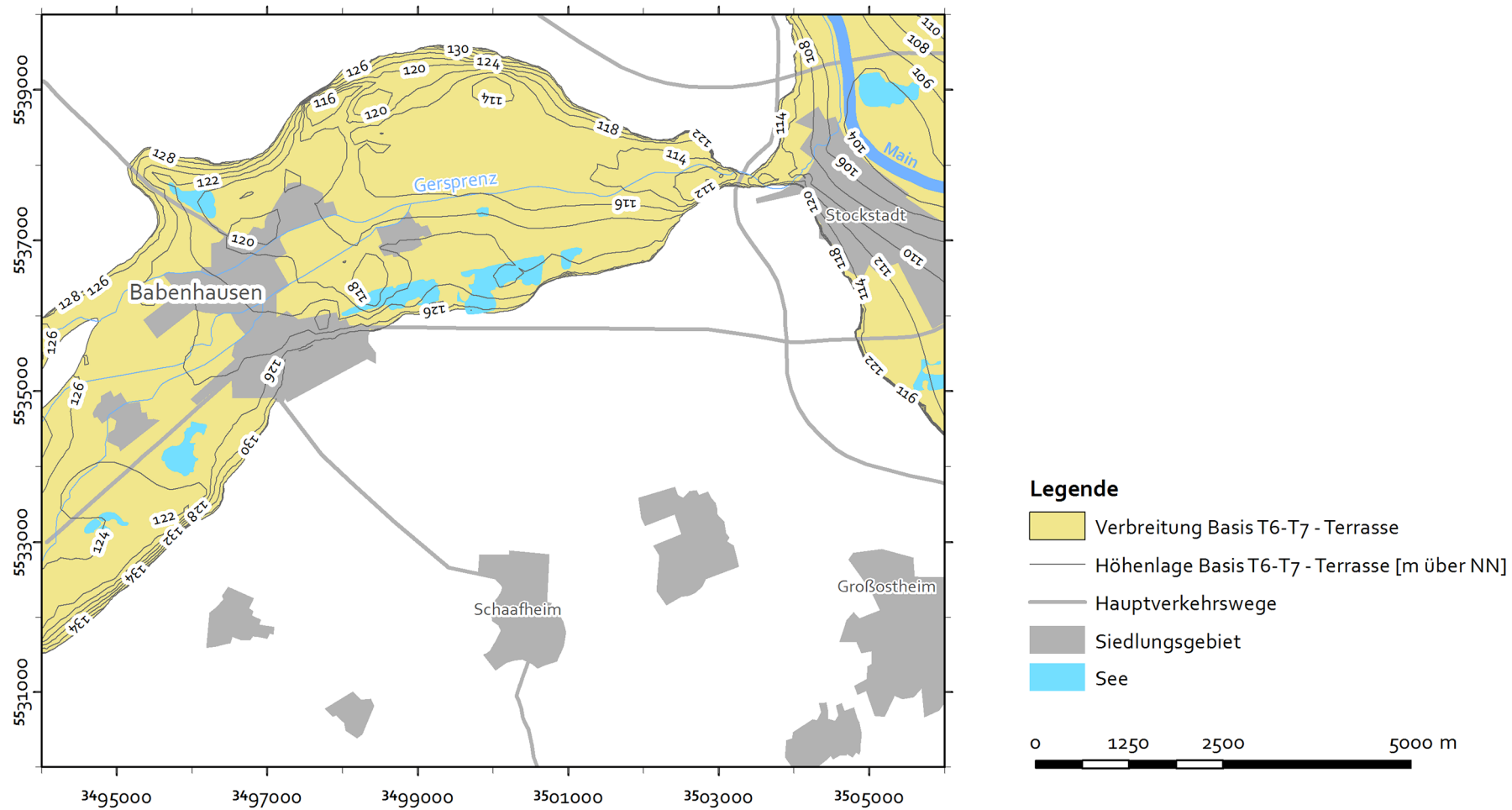
- Dietrich, P. und Leven, C. (2006): Direct push-technologies. In: Kirsch, R. (Hrsg.): Groundwater geophysics, 321–340. Springer, Berlin.
- Drefke, C. (2010): Identifikation von differentieller Advektion in einem porösen Lockergesteinsaquifer zwischen Baggersee & Rohwassergewinnungsbrunnen mittels tiefenorientierter Korngrößenanalyse, Multilevel-Pumpversuchen und Multilevel-Temperaturmessungen. Studienarbeit, TU Darmstadt, unveröffentlicht.
- Engelhardt, I.; Piepenbrink, M.; Trauth, N.; Stadler, S.; Kludt, C.; Schulz, M.; Schüth, C. und Ternes, T. A. (2011): Comparison of tracer methods to quantify hydrodynamic exchange within the hyporheic zone. *Journal of Hydrology* 400: 255–266.
- Fleckenstein, J. H., Krause, S., Hannah, D. M. und Boano, F. (2010): Groundwater-surface water interactions: New methods and models to improve understanding of processes and dynamics. *Advances in Water Resources* 33: 1291–1295.
- Fuchs, S. (2010): Deterministische kf-Wert-Schätzung nach petrographischer Bohrgutansprache. *Grundwasser* 15 (3): 177–189.
- Fuchs, S. und Nillert, P. (2010): Deterministische kf-Wert-Schätzung nach petrographischer Bohrgutansprache – Theorie und praktische Anwendung. Posterbeitrag auf der Tagung der FH-DGG in Tübingen.
- Händel, F. und Dietrich, P. (2012): Relevance of deterministic structures for modeling of transport: the Lauswiesen case study. *Ground Water* 50 (6): 935–942.
- Hantush, M. S. (1960): Modification of the theory of leaky aquifers. *Jour. of Geophys. Res.* 65 (11): 3713–3725.
- Harbaugh, A. W. (2005): Modflow-2005, The U. S. Geological Survey Modular Ground-Water Model – the Ground-Water Flow Process. U. S. Geological Survey Techniques and Methods 6-A16.
- Hatch, C. E.; Fisher, A. T., Revenaugh, J. S.; Constantz, J. und Ruehl, C. (2006): Quantifying surface water – groundwater interactions using time series analysis of streambed thermal records: Method development. *Water Resources Research* 42: 1–14, W10410, doi:10.1029/2005WR004787.
- Hazen, A. (1893): Some physical properties of sands and gravels with special reference to their use in filtration. *Ann. Rep. Mass. State Bd. Health* 24: 541–556.
- Hoppe, A.; Lang, S.; Lerch, C. und Marinoni, O. (2006): Geology and a spatial decision support system for the surroundings of urban areas: An example from southern Hesse (Germany). *Z. dt. Ges. Geowiss.* 157 (1): 135–146.
- Hubert, T. (2011): Methodische Ansätze zur geologischen 3D-Modellierung oberflächennaher Schichtenfolgen und ihre Auswirkung auf die numerische Grundwassermodellierung. Dissertation, Universität Halle.

- Huggenberger, P. (1993): Radar facies: recognition of facies patterns and heterogeneities within Pleistocene Rhine gravels, NE Switzerland. In: Best, J. L.; Bristow, C. S.: Braided Rivers. Geological Society Special Publication 75: 163–176.
- Huggenberger, P.; Hoehn, E. und Beschta, R. (1998): Abiotic aspects of channels and flood-plains in riparian ecology. *Freshwater Biology* 40: 407–425.
- Jol, H. M. und Bristow, C. S. (2003): GPR in sediments: advice on data collection, basic processing and interpretation, a good practice guide. – In Bristow, C. S.; Jol, H. M. (eds.) Ground penetrating radar in sediments. Geological Society, London Special Publication 211.
- Käss, W. (1992): Geohydrologische Markierungstechnik. Gebrüder Bornträger.
- Kalbus, E.; Reinstorf, F. und Schirmer, M. (2006): Measuring methods for groundwater – surface water interactions: a review. *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 10: 873–887.
- Kaufmann, O und Martin T. (2008): 3D geological modelling from boreholes, cross-sections and geological maps, application over former natural gas storages in coal mines. *Computers & Geosciences* 34 (3): 278–290.
- Kinzelbach, W. und Rausch, R. (1995): Grundwassermodellierung: Eine Einführung mit Übungen. Gebrüder Bornträger, Berlin Stuttgart.
- Kluth, C. (2009): Untersuchung der Interaktion von Oberflächengewässern mit dem Grundwasser unter Einsatz hochaufgelöster, tiefenorientierter Temperaturmessungen am Beispiel des Schwarzbachs. Studienarbeit, TU Darmstadt, unveröffentlicht.
- Kolditz, O.; Bauer, S.; Bilke, L.; Böttcher, N.; Delfs, J. O.; Fischer, T.; Görke, U. J.; Kalbacher, T.; Kosakowski, G.; McDermott, C. I.; Park, C. H.; Radu, F.; Rink, K.; Shao, H.; Shao, H. B.; Sun, F.; Sun, Y. Y.; Singh, A. K.; Taron, J.; Walther, M.; Wang, W.; Watanabe, N.; Wu, N.; Xie, M.; Xu, W. und Zehner, B. (2012): OpenGeoSys: an open-source initiative for numerical simulation of thermos-hydro-mechanical/chemical (THM/C) processes in porous media. *Environmental Earth Sciences* 67 (2): 589–599.
- Lamelas, M. T.; Marinoni, O.; Hoppe, A. und de la Riva, J. (2009): Modelling of environmental variables for geohazards and georesources assessment to support sustainable land-use decision – an example from Zaragoza (Spain). *Geomorphology* 111: 88–103.
- Lang, S. (2007): Die geologische Entwicklung der Hanau-Seligenstädter Senke (Hessen, Bayern). Dissertation, TU Darmstadt.
- Langguth, H. R. und Voigt, R. (2004): Hydrogeologische Methoden, Springer Verlag, Berlin.
- Lerch, C. und Hoppe, A. (2007): Erstellung eines geologischen 3D-Modells zur verbesserten Berechnung der Schutzfunktion der Grundwasserüberdeckung. *Grundwasser* 12 (2): 144–153.

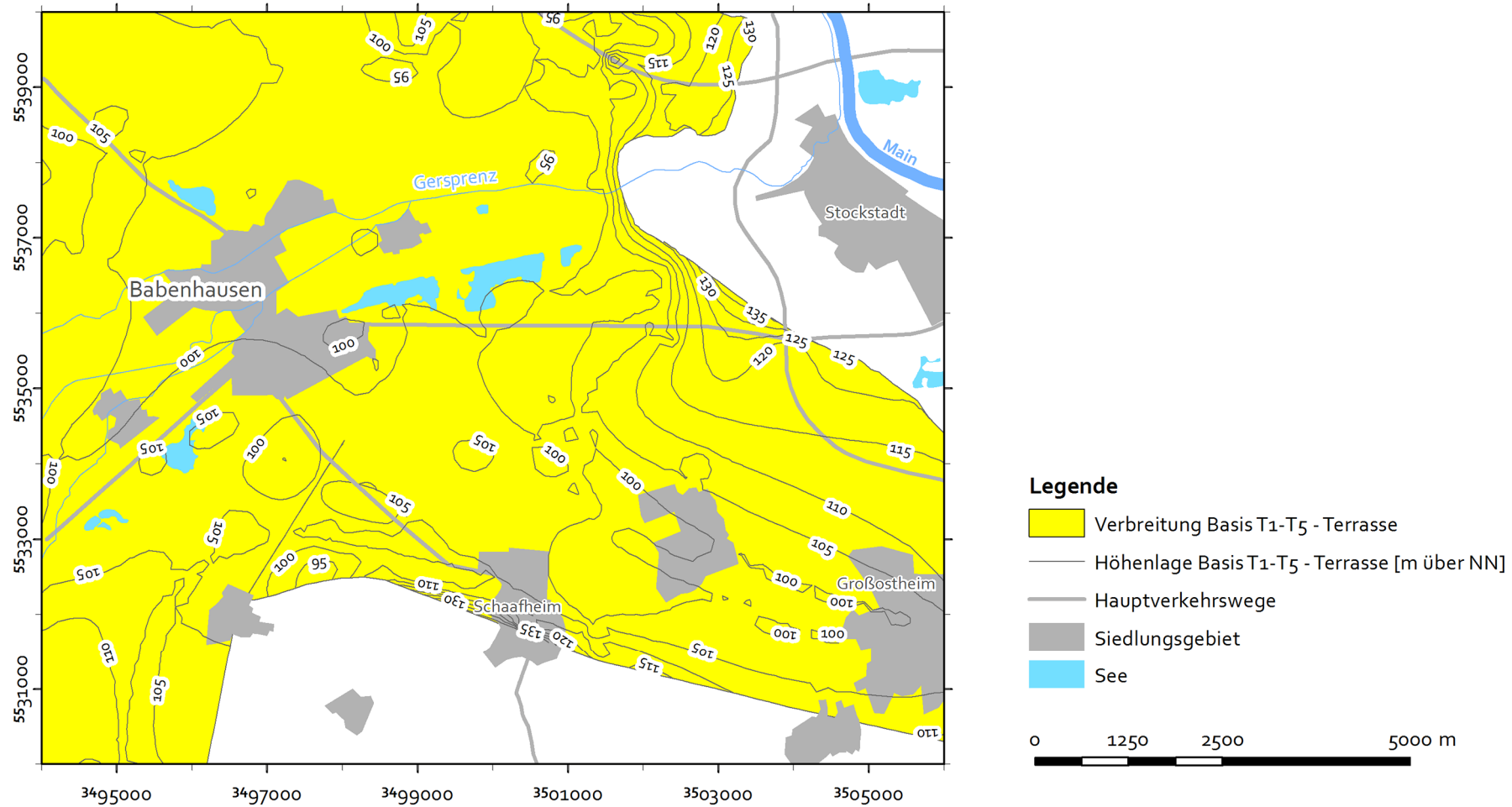
- Lewin, I.; Drefke, C.; Piepenbrink, M.; Schüth, C. und Hoppe, A. (2014): Ermittlung der hydraulischen Durchlässigkeit von quartären Sedimenten mittels Siebanalysen und Pumpversuchen. *Grundwasser* 19: 127–135.
- Li, W.; Englert, A.; Cirpka, O. A. und Vereecken, H. (2008): Three-dimensional geostatistical inversion of flowmeter and pumping test data. *Ground Water* 46 (2): 193–201.
- Lischeid, G.; Natkhin, M.; Steidl, J.; Dietrich, O.; Dannowski, R. und Merz, C. (2010): Assessing coupling between lakes and layered aquifers in a complex Pleistocene landscape based on water level dynamics. *Advances in Water Resources* 33: 1331–1339.
- Mallet, J. L. (1989): Discrete smooth interpolation. *ACM Transactions on Graphics* 8 (2): 121–144.
- Mallet, J. L. (2002): *Geomodeling*. Oxford University Press.
- Matthes, S.; Nusche, K.; Dietrich, P. und Vienken, T. (2012): Auswirkungen von Messunsicherheiten bei der Korngrößenanalyse auf die Berechnung des Durchlässigkeitsbeiwertes. *Grundwasser* 17 (2): 10–111.
- Molina-Giraldo, N.; Bayer, P.; Blum, P. und Cirpka, O. A. (2010): Propagation of seasonal temperature signals into an aquifer upon bank infiltration. *Ground Water* 49 (4): 491–502.
- Neuman, S. P. (1974): Effect of partial penetration on flow in unconfined aquifers considering delayed gravity response. *Water Resources Research* 10 (2): 303–312.
- Panteleit, B.; Jensen, S.; Seiter, K.; Budde, H. und McDiarmid, J. (2013): A regional geological and groundwater flow model of Bremen (Germany): an example management tool for resource administration. *Zeitschrift der Deutschen Geologischen Gesellschaft für Geowissenschaften* 164 (4): 569–580.
- Paradigm (2014): *SKUA-GOCAD™ User Guide Part IX: Reservoir Modeling*.
- Ramón, J. C. und Cross T. A (1997): Characterization and prediction of reservoir architecture and petrophysical properties in fluvial channel sandstones, middle Magdalena Basin, Columbia. *Ciencia, Tecnología y Futuro* 1 (3): 19–46.
- Regierung von Unterfranken, Würzburg; Regierungspräsidium Darmstadt, Darmstadt (1999): *Rahmenuntersuchung zu den Grundwasserverhältnissen im bayerisch-hessischen Maingebiet – Gemeinsame grenzüberschreitende Studie*.
- Schäfer, W. (2016): *Modellierung der Grundwasserströmung*. http://www.schaefer-gwm.de/downloads/mod_gws.pdf, Stand Juli 2016.
- Scheer, H.-D. (1976): Die pleistozänen Flußterrassen in der östlichen Untermainebene. *Geol. Jb. Hessen* 104: 61–86.
- Schudel, B.; Biaggi, D.; Derve, T.; Kozel, R.; Müller, I.; Ross, J. H. und Schindler, U. (2002): Einsatz künstlicher Tracer in der Hydrogeologie – Praxishilfe. *Berichte des BWG, Serie Geologie Nummer 3*.

- Sophocleous, M. (2002): Interactions between groundwater and surface water: the state of the science. *Hydrogeology Journal* 10: 52–67.
- Spottke I.; Zechner E. und Huggenberger P. (2005): The southeastern border of the Upper Rhine Graben: A 3D geological model and its importance for tectonics and groundwater flow. *International Journal of Earth Sciences* 94: 580–593.
- Theis, C. V. (1935): The relation between the lowering of the piezometric surface and the rate and duration of discharge of a well using ground-water storage. *Amer. geophys. Union Trans.* 16: 519–524.
- Trauth, N. (2008): Quantifizierung des Austausches zwischen Fluss- und Grundwasser im Hessischen Ried mittels hochaufgelöster tiefenorientierter Messung der Temperatur und natürlicher Tracer. Diplomarbeit, TU Darmstadt, unveröffentlicht.
- Vogt, T.; Schneider, P.; Hahn-Woernle, L. und Cirpka, O. A. (2010): Estimation of seepage rates in a losing stream by means of fiber-optic high-resolution vertical temperature profiling. *Journal of Hydrology* 380: 154–164.
- Winter, T. C. (1999): Relation of streams, lakes and wetlands to ground water flow systems. *Hydrogeology Journal* 7: 28–45.
- Winter, T. C.; Harvey, J. W.; Franke, O. L. und Alley, W. M. (1998): Groundwater and surface water, a single resource. US Geological Survey, Circular 1139, Denver, CO.
- Woessner, W. W. (2000): Streams and fluvial planes ground water interactions: rescaling hydrogeologic thought. *Ground Water* 38: 423–429.
- Wycisk, P.; Hubert, T.; Gossel, W. und Neumann, Ch. (2009): High-resolution 3D spatial modelling of complex geological structures for an environmental risk assessment of abundant mining and industrial mega sites. *Computers & Geosciences* 35 (1): 165–182.

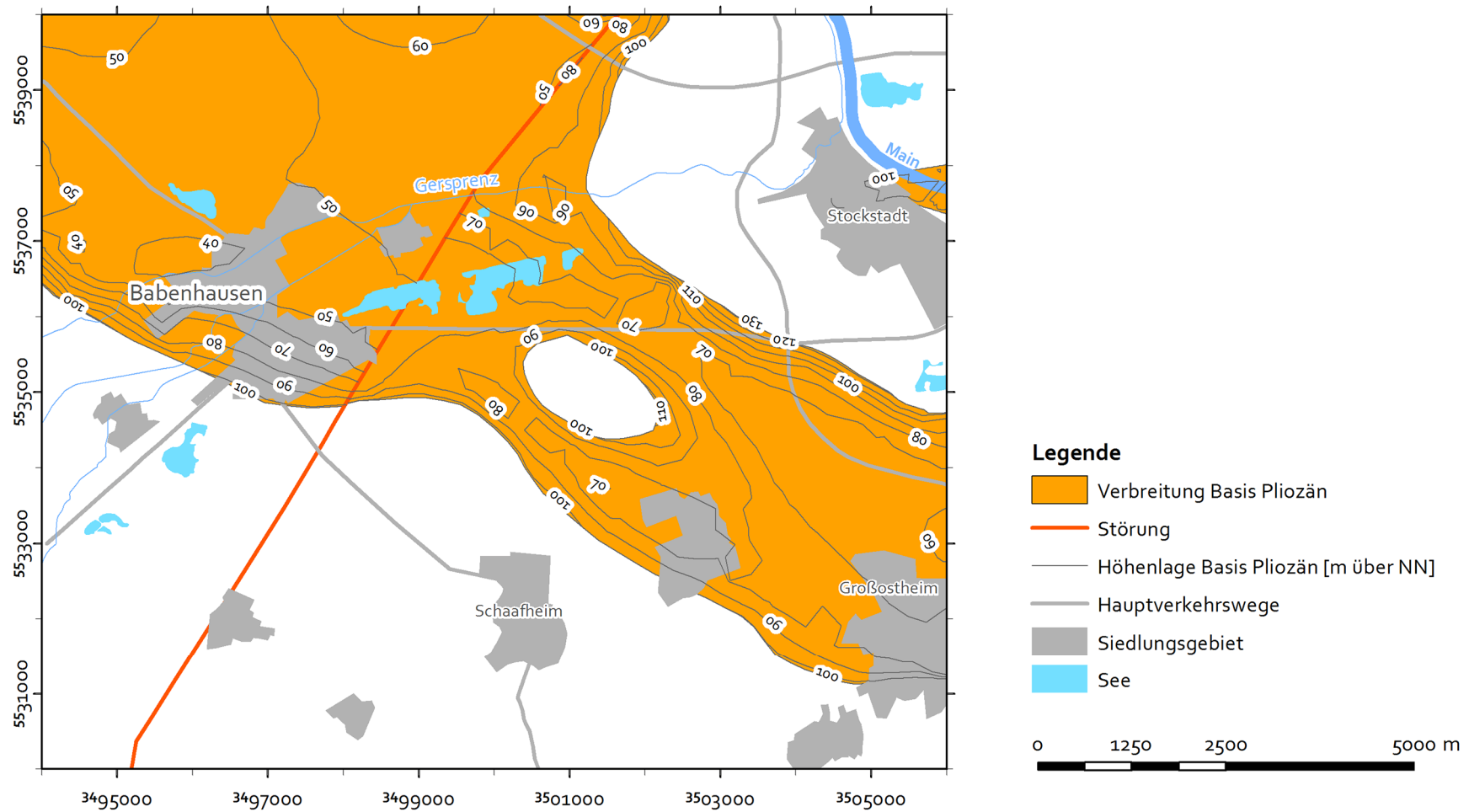
7. Anhang



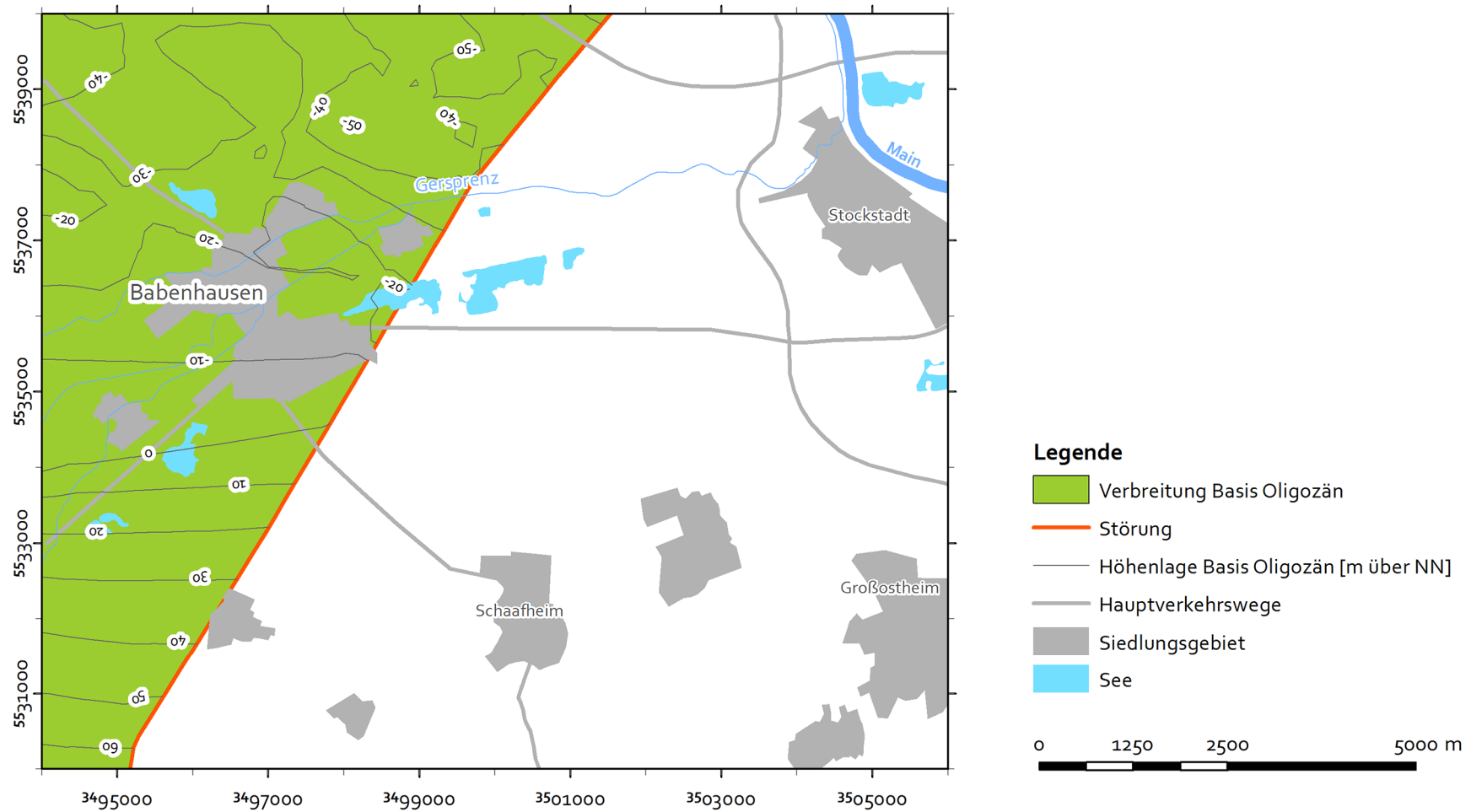
Anhang, Abb. A1: Geologisches Basismodell – Verbreitung und Höhenlage der Basis T6-T7-Terrasse



Anhang, Abb. A2: Geologisches Basismodell – Verbreitung und Höhenlage der Basis T1-T5-Terrasse



Anhang, Abb. A3: Geologisches Basismodell – Verbreitung und Höhenlage der Basis Pliozän



Anhang, Abb. A4: Geologisches Basismodell – Verbreitung und Höhenlage der Basis Oligozän

Anhang, Tab. A1: Durchlässigkeitsbeiwerte aus Sieb- und Schlämmanalysen vom Testfeld (D – Siebdurchgang, U – Ungleichförmigkeitsgrad)

Messstelle	Nr.	Schicht		Sieb- und Schlämmanalysen					Hazen (1893) [m/s]	Durchlässigkeitsbeiwert	
		von [m]	bis [m]	D10 [-]	D15 [-]	D20 [-]	D60 [-]	U [-]		Białas und Kleczkowski (1970) [m/s]	Beyer (1964) [m/s]
GWM_T1A	1	0,00	0,76	0,132	0,1827	0,2332	1,78711	13,5		1,27E-04	1,22E-04
GWM_T1A	2	0,76	2,00	0,257	0,3394	0,4217	1,48797	5,8		4,94E-04	5,29E-04
GWM_T1A	3	2,00	2,70	0,334	0,4622	0,5956	6,12652	18,4		1,09E-03	7,80E-04
GWM_T1A	4	2,70	2,99	0,288	0,3343	0,3805	0,77225	2,7	9,63E-04	3,90E-04	8,31E-04
GWM_T1A	5	2,99	3,67	0,200	0,2835	0,3575	0,99131	5,0	4,64E-04	3,38E-04	3,60E-04
GWM_T1A	6	3,67	4,12	0,028	0,0724	0,116	0,33728	12,3		2,54E-05	
GWM_T1A	7	4,12	4,92	0,221	0,2715	0,3072	0,66901	3,0	5,69E-04	2,38E-04	4,42E-04
GWM_T1A	8	4,92	5,20	0,161	0,1906	0,2205	0,41948	2,6	3,00E-04	1,11E-04	2,58E-04
GWM_T1A	9	5,20	5,56	0,249	0,2986	0,3477	0,71227	2,9	7,21E-04	3,17E-04	6,21E-04
GWM_T1A	10	5,56	6,21	0,264	0,3173	0,3703	1,10331	4,2	8,10E-04	3,66E-04	6,29E-04
GWM_T1A	11	6,21	6,76	0,225	0,2935	0,3536	1,69496	7,5		3,30E-04	4,05E-04
GWM_T1A	12	6,76	7,11	0,092	0,1282	0,145	0,32163	3,5	9,84E-05	4,24E-05	7,64E-05
GWM_T1A	13	7,11	7,52	0,322	0,4059	0,4893	0,98975	3,1	1,20E-03	6,95E-04	9,36E-04
GWM_T1A	14	7,52	7,95	0,231	0,279	0,318	0,66567	2,9	6,17E-04	2,58E-04	5,33E-04
GWM_T1A	15	7,95	8,25	0,336	0,4258	0,5138	2,17542	6,5		7,78E-04	9,05E-04
GWM_T1A	16	8,25	9,04	0,326	0,387	0,4481	0,76187	2,3	1,23E-03	5,68E-04	1,06E-03
GWM_T1A	17	9,04	9,81	0,253	0,3081	0,3635	0,75769	3,0	7,40E-04	3,51E-04	6,38E-04
GWM_T1A	18	9,81	10,30	0,373	0,4896	0,5683	1,56536	4,2	1,61E-03	9,81E-04	1,25E-03
GWM_T1A	19	10,30	10,82	0,288	0,349	0,4102	0,86341	3,0	9,61E-04	4,64E-04	8,29E-04
GWM_T1A	20	10,82	11,79	0,348	0,477	0,5756	2,88272	8,3		1,01E-03	9,64E-04
GWM_T1A	21	11,79	12,59	0,273	0,3677	0,4619	6,14716	22,5		6,09E-04	
GWM_T1A	22	12,59	13,30	0,324	0,5367	0,7224	17,0926	52,8		1,70E-03	
GWM_T1A	23	13,30	14,15	0,335	0,4885	0,6245	3,98943	11,9		1,22E-03	7,83E-04
GWM_T1A	24	14,15	14,59	0,002	0,0028	0,0035	0,01309	6,1		8,19E-09	
GWM_T1A	25	14,59	15,34	0,511	0,7699	1,0516	15,8799	31,0		4,04E-03	
GWM_T2A	1	0,00	0,69	0,076	0,1362	0,1789	4,62853	61,3			
GWM_T2A	2	0,69	1,26	0,116	0,1348	0,1473	0,24687	2,1	1,57E-04	4,40E-05	1,36E-04

Anhang, Tab. A1: Durchlässigkeitsbeiwerte aus Sieb- und Schlämmanalysen vom Testfeld (Teil 2)

Messstelle	Schicht	Sieb- und Schlämmanalyse							Durchlässigkeitsbeiwert		
	Nr.	von [m]	bis [m]	D10 [-]	D15 [-]	D20 [-]	D60 [-]	U [-]	Hazen (1893) [m/s]	Białas und Kleczkowski (1970) [m/s]	Beyer (1964) [m/s]
GWM_T2A	3	1,26	2,36	0,307	0,4691	0,588	2,89752	9,4		1,06E-03	7,55E-04
GWM_T2A	4	2,36	3,00	0,390	0,5047	0,5536	0,94535	2,4	1,76E-03	9,24E-04	1,52E-03
GWM_T2A	5	3,00	3,54	0,241	0,2965	0,3479	0,74027	3,1	6,73E-04	3,17E-04	5,22E-04
GWM_T2A	6	3,54	4,16	0,178	0,226	0,2631	0,47249	2,7	3,69E-04	1,67E-04	3,18E-04
GWM_T2A	7	4,16	4,48	0,267	0,4028	0,55	4,29906	16,1		9,10E-04	5,00E-04
GWM_T2A	8	4,48	4,91	0,360	0,4494	0,5243	0,97204	2,7	1,50E-03	8,15E-04	1,30E-03
GWM_T2A	9	4,91	5,04	0,375	0,5121	0,6277	13,0401	34,8		1,23E-03	
GWM_T2A	10	5,04	5,54	0,229	0,3273	0,4186	1,34708	5,9		4,86E-04	4,20E-04
GWM_T2A	11	5,54	6,10	0,256	0,3524	0,4489	1,5687	6,1		5,70E-04	5,24E-04
GWM_T2A	12	6,10	6,83	0,283	0,3424	0,4019	1,19547	4,2	9,28E-04	4,42E-04	7,20E-04
GWM_T2A	13	6,83	7,72	0,179	0,2454	0,2839	0,71984	4,0	3,70E-04	1,99E-04	2,87E-04
GWM_T2A	14	7,72	7,86	0,271	0,3605	0,4498	9,77467	36,0		5,73E-04	
GWM_T2A	15	7,86	8,66	0,292	0,3503	0,4086	0,9339	3,2	9,89E-04	4,60E-04	7,68E-04
GWM_T2A	16	8,66	9,37	0,314	0,3756	0,4375	0,88838	2,8	1,14E-03	5,38E-04	9,83E-04
GWM_T2A	17	9,37	9,44	0,025	0,0626	0,2449	6,0446	246,0			
GWM_T2A	18	9,44	9,80		0,0051	0,0136	0,23328				
GWM_T2A	19	9,80	9,92	0,195	0,2907	0,4061	11,9154	61,2			
GWM_T2A	20	9,92	10,46	0,317	0,3871	0,4571	1,0299	3,2	1,16E-03	5,95E-04	9,06E-04
GWM_T2A	21	10,46	10,80	0,276	0,4317	0,5968	12,4108	44,9		1,10E-03	
GWM_T2A	22	10,80	11,80	0,286	0,4081	0,5355	5,60736	19,6		8,56E-04	5,72E-04
GWM_K1A	1	0,00	0,17	0,144	0,1607	0,1775	0,34902	2,4	2,40E-04	6,75E-05	2,08E-04
GWM_K1A	2	0,17	0,33	0,187	0,2359	0,2756	0,78349	4,2	4,07E-04	1,86E-04	3,16E-04
GWM_K1A	3	0,33	0,63	0,147	0,2116	0,2817	1,36981	9,3		1,95E-04	1,73E-04
GWM_K1A	4	0,63	1,13	0,214	0,3193	0,4054	1,35832	6,3		4,51E-04	3,67E-04
GWM_K1A	5	1,13	1,62	0,046	0,1112	0,2615	1,83296	40,0		1,65E-04	
GWM_K1A	6	1,62	1,79	0,109	0,1559	0,204	0,54406	5,0	1,38E-04	9,30E-05	1,07E-04

Anhang, Tab. A1: Durchlässigkeitsbeiwerte aus Sieb- und Schlämmanalysen vom Testfeld (Teil 3)

Messstelle	Nr.	Schicht		Sieb- und Schlämmanalyse					Hazen (1893) [m/s]	Durchlässigkeitsbeiwert	
		von [m]	bis [m]	D10 [-]	D15 [-]	D20 [-]	D60 [-]	U [-]		Białas und Kleczkowski (1970) [m/s]	Beyer (1964) [m/s]
GWM_K1A	7	1,79	2,07	0,555	0,6998	0,8442	6,16185	11,1		2,44E-03	2,16E-03
GWM_K1A	8	2,07	2,44	0,407	0,5182	0,5779	1,20408	3,0	1,92E-03	1,02E-03	1,66E-03
GWM_K1A	9	2,44	2,85	0,311	0,3734	0,4359	0,86916	2,8	1,12E-03	5,33E-04	9,64E-04
GWM_K1A	10	2,85	3,00	0,235	0,2964	0,3483	0,97263	4,1	6,38E-04	3,18E-04	4,96E-04
GWM_K1A	11	3,00	3,35	0,261	0,2891	0,3173	0,58556	2,2	7,89E-04	2,57E-04	6,81E-04
GWM_K1A	12	3,35	3,79	0,186	0,2362	0,2649	0,42915	2,3	4,01E-04	1,70E-04	3,46E-04
GWM_K1A	13	3,79	4,57	0,181	0,2425	0,2748	0,50201	2,8	3,82E-04	1,85E-04	3,30E-04
GWM_K1A	14	4,57	5,03	0,220	0,2625	0,2848	0,46292	2,1	5,63E-04	2,00E-04	4,85E-04
GWM_K1A	15	5,03	5,49	0,196	0,2467	0,2694	0,43511	2,2	4,46E-04	1,76E-04	3,84E-04
GWM_K1A	16	5,49	5,79	0,148	0,1788	0,209	0,4507	3,0	2,56E-04	9,84E-05	1,98E-04
GWM_K1A	17	5,79	6,40	0,237	0,2911	0,3385	0,83132	3,5	6,50E-04	2,98E-04	5,04E-04
GWM_K1A	18	6,40	8,00	0,292	0,3503	0,4086	0,9339	3,2	9,89E-04	4,60E-04	7,68E-04

Anhang, Tab. A2: Durchlässigkeitsbeiwerte aus Sieb- und Schlämmanalysen von Rückstellproben

Messstelle	Nr.	Schicht		Sieb- und Schlämmanalyse					Hazen (1893) [m/s]	Durchlässigkeitsbeiwert	
		von [m]	bis [m]	D10 [-]	D15 [-]	D20 [-]	D60 [-]	U [-]		Białas und Kleczkowski (1970) [m/s]	Beyer (1964) [m/s]
GWM_50159	1	0,20	0,90	0,102	0,1303	0,1429	0,24319	2,4	1,19E-04	4,10E-05	1,03E-04
GWM_50159	2	0,90	1,60	0,097	0,1362	0,1637	0,64461	6,7		5,60E-05	7,50E-05
GWM_50159	3	1,60	2,20		0,0017	0,0034	0,02745				
GWM_50159	4	2,20	3,40	0,199	0,2883	0,35	0,95645	4,8	4,58E-04	3,22E-04	3,55E-04
GWM_50159	5	3,40	4,50	0,290	0,3548	0,4193	0,97968	3,4	9,78E-04	4,88E-04	7,59E-04
GWM_50159	6	4,50	5,30	0,102	0,1303	0,1429	0,24319	2,4	1,19E-04	4,10E-05	1,03E-04

Anhang, Tab. A2: Durchlässigkeitsbeiwerte aus Sieb- und Schlämmanalysen von Rückstellproben (Teil 2)

Messstelle	Nr.	Schicht		Sieb- und Schlämmanalyse					Hazen (1893) [m/s]	Durchlässigkeitsbeiwert	
		von [m]	bis [m]	D10 [-]	D15 [-]	D20 [-]	D60 [-]	U [-]		Białas und Kleczkowski (1970) [m/s]	Beyer (1964) [m/s]
GWM_50159	7	5,30	6,00	0,250	0,2893	0,3285	0,71159	2,8	7,25E-04	2,78E-04	6,25E-04
GWM_50159	8	6,00	7,00	0,497	0,6752	0,8539	10,0792	20,3		2,50E-03	
GWM_50159	9	7,00	10,00	0,370	0,4899	0,587	2,82109	7,6	7,63E-04	1,06E-03	1,09E-03
GWM_50159	10	10,00	14,00	0,256	0,3119	0,3674	0,87254	3,4		3,60E-04	5,92E-04
GWM_50159	11	14,00	17,00	0,331	0,4228	0,5133	1,69637	5,1		7,76E-04	8,75E-04
GWM_50159	12	17,00	18,10	0,226	0,3767	0,5281	9,72354	43,1		8,29E-04	
GWM_50159	13	18,10	20,00	0,742	0,9989	2,0467	34,6364	46,7		1,87E-02	
GWM_50159	14	20,00	21,00	0,478	0,6537	0,8356	8,61065	18,0		2,38E-03	1,60E-03
GWM_50159	15	21,00	23,00	0,405	0,5185	0,6491	17,7485	43,8		1,33E-03	
GWM_50159	16	23,00	24,00	0,434	0,5539	0,6675	31,8937	73,5	8,09E-05		
GWM_50159	17	24,00	25,00	0,796	1,2645	3,6632	59,2205	74,4			
GWM_50161	1	0,00	0,80	0,084	0,1256	0,1444	0,39301	4,7		4,20E-05	6,28E-05
GWM_50161	2	0,80	1,00	0,313	0,3956	0,4779	5,54555	17,7		6,59E-04	6,87E-04
GWM_50161	3	1,00	2,00	0,245	0,3687	0,4951	23,9109	97,7			
GWM_50161	4	2,00	4,00	0,074	0,1645	0,2171	0,43247	5,9		1,07E-04	4,37E-05
GWM_50161	5	4,00	5,00	0,278	0,3345	0,3909	0,81451	2,9		4,15E-04	7,74E-04
GWM_50161	6	5,00	6,00	0,282	0,3501	0,4179	3,65673	13,0	8,97E-04	4,84E-04	5,58E-04
GWM_50161	7	6,00	9,00	0,199	0,262	0,316	0,85971	4,3		2,54E-04	3,56E-04
GWM_50161	8	9,00	10,00	0,236	0,2947	0,3461	0,77692	3,3	6,44E-04	3,14E-04	5,00E-04
GWM_50161	9	10,00	11,00	0,226	0,289	0,34	0,79094	3,5		3,01E-04	4,60E-04
GWM_50161	10	11,00	13,00	0,381	0,4861	0,6255	51,3315	134,6	5,92E-04		
GWM_50161	11	13,00	25,00	0,722	0,9368	1,2562	10,0681	13,9		6,08E-03	
GWM_50163	1	0,20	0,80	0,078	0,1265	0,159	0,75238	9,7		5,24E-05	4,84E-05
GWM_50163	2	0,80	2,00	0,126	0,1491	0,172	0,41622	3,3		6,28E-05	1,44E-04
GWM_50163	3	2,00	3,00	0,161	0,2715	0,4132	4,82626	30,1		4,71E-04	
GWM_50163	4	3,00	7,00	0,245	0,3026	0,3578	0,95476	3,9		3,38E-04	5,39E-04

Anhang, Tab. A2: Durchlässigkeitsbeiwerte aus Sieb- und Schlämmanalysen von Rückstellproben (Teil 3)

Messstelle	Nr.	Schicht		Sieb- und Schlämmanalyse					Hazen (1893) [m/s]	Durchlässigkeitsbeiwert	
		von [m]	bis [m]	D10 [-]	D15 [-]	D20 [-]	D60 [-]	U [-]		Białas und Kleczkowski (1970) [m/s]	Beyer (1964) [m/s]
GWM_50163	5	7,00	18,00	0,161	0,2125	0,2602	0,65054	4,0	3,02E-04	1,63E-04	2,34E-04
GWM_50163	6	18,00	19,80	0,216	0,2857	0,3563	18,0124	83,6			
GWM_50163	7	19,80	20,30	0,002	0,0107	0,0265	0,44167	194,4			
GWM_50163	8	20,30	25,00	0,636	0,8732	1,4082	21,8353	34,3			
GWM_50168	1	0,20	0,60	0,000	0,0984	0,1314	0,42237	0,0	2,34E-04 3,60E-04 6,86E-04 7,48E-04 1,05E-03 7,44E-04 7,26E-04 9,06E-04 1,00E-03	7,91E-03	2,87E-04 2,37E-04 1,82E-04 2,80E-04 5,33E-04 1,68E-03 5,45E-04 6,45E-04 4,24E-04 8,21E-04 1,16E-03 6,42E-04 6,26E-04 3,21E-04 8,63E-04 9,43E-04 1,30E-03 2,66E-01
GWM_50168	2	0,60	1,30	0,172	0,2557	0,3328	0,97202	5,6			
GWM_50168	3	1,30	2,00	0,142	0,1956	0,2492	0,47729	3,4			
GWM_50168	4	2,00	2,80	0,176	0,2462	0,2923	0,80568	4,6			
GWM_50168	5	2,80	3,40	0,243	0,3168	0,3877	1,09946	4,5			
GWM_50168	6	3,40	4,10	0,459	0,5994	0,7212	3,20472	7,0			
GWM_50168	7	4,10	4,80	0,279	0,348	0,4171	3,84864	13,8			
GWM_50168	8	4,80	5,80	0,254	0,2895	0,325	0,68408	2,7			
GWM_50168	9	5,80	6,50	0,230	0,2906	0,3445	1,95682	8,5			
GWM_50168	10	6,50	7,00	0,302	0,3487	0,3955	0,92326	3,1			
GWM_50168	11	7,00	8,00	0,382	0,4674	0,5529	3,34251	8,8			
GWM_50168	12	8,00	9,00	0,253	0,2874	0,3215	0,67097	2,6			
GWM_50168	13	9,00	10,00	0,250	0,2781	0,306	0,58461	2,3			
GWM_50168	14	10,00	11,00	0,330	0,3979	0,4656	18,9842	57,5			
GWM_50168	15	11,00	12,00	0,279	0,3144	0,3494	0,74027	2,6			
GWM_50168	16	12,00	13,00	0,294	0,3355	0,3773	0,85818	2,9			
GWM_50168	17	13,00	14,00	0,344	0,4101	0,4766	1,95067	5,7			
GWM_50168	18	14,00	15,00	0,297	0,418	0,6429	16,2931	54,8			
GWM_50168	19	15,00	16,00	0,607	0,836	1,2614	46,4913	76,5			
GWM_50168	20	16,00	17,00	0,619	0,8485	1,2945	45,3785	73,3			
GWM_50168	21	17,00	18,00	1,159	2,9729	6,4957	40,4056	34,9			
GWM_50168	22	18,00	19,60	0,589	0,8106	1,1201	38,385	65,1			

Anhang, Tab. A2: Durchlässigkeitsbeiwerte aus Sieb- und Schlämmanalysen von Rückstellproben (Teil 4)

Messstelle	Nr.	Schicht		Sieb- und Schlämmanalyse					Hazen (1893)	Durchlässigkeitsbeiwert	
		von	bis	D10	D15	D20	D60	U		Białas und Kleczkowski (1970)	Beyer (1964)
		[m]	[m]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[m/s]	[m/s]	[m/s]
GWM_50168	23	19,60	20,10	0,000	0	0,0051	0,09658	0,0			
GWM_50168	24	20,10	21,00	0,236	0,3046	0,3662	0,9342	4,0	6,45E-04	3,57E-04	5,01E-04
GWM_50167	25	21,00	22,40	0,000	0	0,0038	0,81801				
GWM_50167	26	22,40	24,70	0,260	0,4088	0,5149	0,82119	3,2	7,82E-04	7,82E-04	6,07E-04
GWM_50167	27	24,70	25,00	0,003	0,0063	0,0209	0,36253	126,9			
GWM_50167	28	25,00	27,00	0,225	0,4256	0,5467	1,85242	8,2		8,98E-04	4,06E-04
GWM_50167	29	27,00	29,00	0,064	0,1482	0,2565	0,75607	11,8		1,57E-04	2,88E-05
GWM_50180	1	2,65	4,00	0,334	0,422	0,506	0,974	2,9	1,29E-03	7,51E-04	1,12E-03
GWM_50180	2	4,00	4,50	0,269	0,351	0,433	1,366	5,1		5,25E-04	5,78E-04
GWM_50180	3	4,50	4,65	0,349	0,459	0,56	3,695	10,6		9,49E-04	8,55E-04
GWM_50180	4	4,65	6,00	0,583	0,583	0,949	7,117	12,2		3,19E-03	2,38E-03
GWM_50180	5	6,00	7,30	0,458	0,568	0,654	1,824	4,0	2,43E-03	1,36E-03	1,89E-03
GWM_50180	6	7,30	8,00	0,501	0,613	0,726	5,694	11,4		1,72E-03	1,76E-03
GWM_50180	7	8,00	10,50	0,351	0,426	0,501	0,968	2,8	1,43E-03	7,34E-04	1,23E-03
GWM_50180	8	10,50	11,00	0,276	0,316	0,367	0,764	2,8	8,84E-04	3,59E-04	7,63E-04
GWM_50180	9	11,00	11,25	0,022	0,056	0,091	0,62	27,9		1,45E-05	
GWM_50180	10	11,25	12,00	0,171	0,247	0,297	0,821	4,8	3,40E-04	2,21E-04	2,64E-04
GWM_50180	11	12,00	12,40	0,280	0,335	0,39	1,878	6,7		4,13E-04	6,28E-04
GWM_50180	12	12,40	13,60	0,277	0,316	0,355	0,787	2,8	8,90E-04	3,33E-04	7,68E-04
GWM_50180	13	13,60	14,45	0,329	0,394	0,458	1,836	5,6		5,97E-04	8,64E-04
GWM_50180	14	14,45	17,55	0,580	0,761	0,941	19,567	33,7		3,13E-03	
GWM_50180	15	17,55	19,30	1,028	1,604	2,195	10,555	10,3		2,20E-02	
GWM_50180	16	19,30	19,60				0,052				
GWM_50180	17	19,60	22,45	0,437	0,623	0,83	21,632	49,5		2,35E-03	
GWM_50180	18	22,45	25,20	0,371	0,511	0,589	1,427	3,8	1,60E-03	1,07E-03	1,24E-03
GWM_50180	19	25,20	25,50				0,004				

Anhang, Tab. A3: Durchlässigkeitsbeiwerte, errechnet aus Multilevel-Pumpversuchen im Testfeld

Messstelle	Schicht		Durchlässigkeitsbeiwert Pumpversuch Neumann (1974) [m/s]
	Nr.	von [m]	bis [m]
GWM_T1B	1	2,13	2,93
GWM_T1B	2	3,13	3,93
GWM_T1B	3	4,13	4,93
GWM_T1B	4	5,13	5,93
GWM_T1B	5	6,13	6,93
GWM_T1B	6	7,13	7,93
GWM_T1B	7	8,13	8,93
GWM_T1B	8	9,13	9,93
GWM_T1B	9	10,13	10,93
GWM_T1B	10	11,13	11,93
GWM_T1B	11	12,13	12,93
GWM_T1B	12	13,13	13,93
GWM_T1B	13	14,13	14,93
GWM_T1B	14	15,13	15,93
GWM_T1B	15	16,13	16,93
GWM_T1B	16	17,13	17,93
GWM_T1B	17	18,13	18,93
GWM_T1B	18	19,13	19,93
GWM_T1B	19	20,13	20,93
GWM_T1B	20	21,13	21,93
GWM_T1B	21	22,13	22,93
GWM_T1B	22	23,13	23,93
GWM_T2B	1	1,96	2,76
GWM_T2B	2	2,96	3,76
GWM_T2B	3	3,96	4,76
GWM_T2B	4	4,96	5,76
GWM_T2B	5	5,96	6,76
GWM_T2B	6	6,96	7,76
GWM_T2B	7	7,96	8,76
GWM_T2B	8	8,96	9,76
GWM_T2B	9	9,96	10,76
GWM_T2B	10	10,96	11,76
GWM_T2B	11	11,96	12,76
GWM_T2B	12	12,96	13,76
GWM_T2B	13	13,96	14,76
GWM_T2B	14	14,96	15,76
GWM_T2B	15	15,96	16,76
GWM_T2B	16	16,96	17,76
GWM_T2B	17	17,96	18,76
GWM_T2B	18	18,96	19,76
GWM_T2B	19	19,96	20,76
GWM_T2B	20	20,96	21,76
GWM_T2B	21	21,96	22,76

Anhang, Tab. A4: Durchlässigkeitsbeiwerte aus petrographischen Schichtbeschreibungen

KF Nr.	Name der Bohrung im Modell	Schicht Nr.	Schicht reicht bis in eine Tiefe von [m un- ter Bohransatz]	Durchlässigkeitsbeiwert Białas und Kleczkowski (1970) [m/s]
1	w_001	2	2,00	7,52E-05
2	w_001	3	4,00	7,55E+00
3	w_001	4	6,00	3,81E-02
4	w_001	5	9,00	3,81E-02
5	w_001	6	12,00	7,55E+00
6	w_002	2	2,00	7,52E-05
7	w_002	3	3,00	5,79E-06
8	w_002	4	4,00	8,88E-07
9	w_002	5	8,00	5,33E-01
10	w_002	6	14,00	7,55E+00
11	w_003	2	1,50	7,52E-05
12	w_003	3	4,00	7,52E-05
13	w_003	4	7,50	7,52E-05
14	w_003	5	7,70	0,00E+00
15	w_003	6	11,50	7,52E-05
16	w_003	7	11,75	0,00E+00
17	w_003	8	12,00	7,52E-05
18	w_003	9	16,00	7,55E+00
19	w_004	2	1,70	7,52E-05
20	w_004	3	2,60	0,00E+00
21	w_004	4	4,00	7,52E-05
22	w_004	5	5,20	2,09E-01
23	w_004	6	9,00	3,98E-08
24	w_004	7	9,30	0,00E+00
25	w_004	8	12,00	3,81E-02
26	w_004	9	15,00	7,55E+00
27	w_005	2	1,75	7,52E-05
28	w_005	3	5,00	7,52E-05
29	w_005	4	8,00	7,55E+00
30	w_005	5	10,00	7,52E-05
31	w_005	6	16,00	5,33E-01
32	w_006	2	10,00	5,33E-01
33	w_006	3	13,00	7,52E-05
34	w_006	4	15,50	7,55E+00
35	w_007	2	2,00	3,81E-02
36	w_007	3	4,00	3,81E-02
37	w_007	4	7,00	7,55E+00
38	w_007	5	9,50	5,33E-01
39	w_007	6	14,00	7,55E+00
40	w_008	2	2,00	7,52E-05
41	w_008	3	6,00	7,52E-05
42	w_008	4	10,00	7,52E-05
43	w_008	5	11,00	7,52E-05
44	w_008	6	13,50	7,55E+00
45	w_009	1	0,30	5,79E-06
46	w_009	2	0,50	4,30E-04

Anhang, Tab. A4: Durchlässigkeitsbeiwerte aus petrographischen Schichtbeschreibungen
(Teil 2)

KF Nr.	Name der Bohrung im Modell	Schicht Nr.	Schicht reicht bis in eine Tiefe von [m un- ter Bohransatz]	Durchlässigkeitsbeiwert Białas und Kleczkowski (1970) [m/s]
47	w_009	3	1,00	2,67E-03
48	w_009	4	11,40	2,67E-03
49	w_009	7	12,30	4,31E-03
50	w_009	9	13,20	5,41E-08
51	w_009	10	17,50	3,50E-04
52	w_010	1	0,25	1,72E-05
53	w_010	2	1,60	7,80E-05
54	w_010	4	2,30	0,00E+00
55	w_010	5	6,00	3,50E-04
56	w_010	7	9,50	2,40E-04
57	w_010	9	17,95	3,50E-04
58	w_011_Brunnen_14	1	2,00	2,40E-04
59	w_011_Brunnen_14	3	3,00	0,00E+00
60	w_011_Brunnen_14	4	5,00	7,80E-05
61	w_011_Brunnen_14	5	7,00	2,40E-04
62	w_011_Brunnen_14	7	8,00	2,40E-04
63	w_011_Brunnen_14	8	9,00	2,04E-04
64	w_011_Brunnen_14	10	10,00	1,09E-03
65	w_011_Brunnen_14	12	12,00	1,09E-03
66	w_011_Brunnen_14	14	13,00	2,40E-04
67	w_011_Brunnen_14	15	14,00	2,12E-03
68	w_011_Brunnen_14	16	15,00	1,09E-03
69	w_011_Brunnen_14	19	17,00	2,04E-04
70	w_011_Brunnen_14	21	18,00	3,50E-04
71	w_011_Brunnen_14	23	19,00	1,91E-04
72	w_011_Brunnen_14	24	20,00	2,40E-04
73	w_011_Brunnen_14	27	23,00	1,09E-03
74	w_011_Brunnen_14	28	26,00	1,09E-03
75	w_011_Brunnen_14	29	27,00	3,50E-04
76	w_011_Brunnen_14	30	27,50	0,00E+00
77	w_011_Brunnen_14	31	28,00	1,91E-04
78	w_011_Brunnen_14	32	30,60	2,40E-04
79	w_011_Brunnen_14	33	31,00	3,98E-08
80	w_011_Brunnen_14	34	33,00	2,40E-04
81	w_011_Brunnen_14	37	34,00	2,04E-04
82	w_011_Brunnen_14	38	37,00	4,04E-05
83	w_011_Brunnen_14	39	40,00	7,80E-05
84	w_011_Brunnen_14	40	42,40	1,51E-04
85	w_011_Brunnen_14	42	43,00	0,00E+00
86	w_011_Brunnen_14	43	44,50	1,58E-04
87	w_012_Brunnen_15	1	0,50	1,72E-05
88	w_012_Brunnen_15	3	1,50	1,72E-05
89	w_012_Brunnen_15	6	3,00	1,09E-03
90	w_012_Brunnen_15	8	5,00	2,99E-03
91	w_012_Brunnen_15	10	6,00	1,09E-03

Anhang, Tab. A4: Durchlässigkeitsbeiwerte aus petrographischen Schichtbeschreibungen (Teil 3)

KF Nr.	Name der Bohrung im Modell	Schicht Nr.	Schicht reicht bis in eine Tiefe von [m unter Bohransatz]	Durchlässigkeitsbeiwert Białas und Kleczkowski (1970) [m/s]
92	w_012_Brunnen_15	13	8,00	2,40E-04
93	w_012_Brunnen_15	15	9,00	6,46E-06
94	w_012_Brunnen_15	16	10,00	5,41E-08
95	w_012_Brunnen_15	19	12,00	1,09E-03
96	w_012_Brunnen_15	21	14,00	1,09E-03
97	w_012_Brunnen_15	22	15,00	3,36E-03
98	w_012_Brunnen_15	24	17,00	2,04E-04
99	w_012_Brunnen_15	26	19,00	0,00E+00
100	w_012_Brunnen_15	27	21,00	2,12E-03
101	w_012_Brunnen_15	28	22,00	3,95E-03
102	w_012_Brunnen_15	29	23,00	2,67E-03
103	w_012_Brunnen_15	33	24,00	1,91E-04
104	w_012_Brunnen_15	34	25,00	1,91E-04
105	w_012_Brunnen_15	36	27,00	1,09E-03
106	w_012_Brunnen_15	38	28,00	1,09E-03
107	w_012_Brunnen_15	40	29,00	4,75E-06
108	w_012_Brunnen_15	41	32,00	1,91E-04
109	w_012_Brunnen_15	42	33,00	1,91E-04
110	w_012_Brunnen_15	44	34,00	2,67E-03
111	w_012_Brunnen_15	46	37,00	2,12E-03
112	w_012_Brunnen_15	47	38,00	0,00E+00
113	w_012_Brunnen_15	48	39,00	2,12E-03
114	w_012_Brunnen_15	49	40,00	1,09E-03
115	w_012_Brunnen_15	52	42,00	1,91E-04
116	w_012_Brunnen_15	54	43,00	2,40E-04
117	w_012_Brunnen_15	56	45,50	5,41E-08
118	w_013	1	6,00	3,50E-04
119	w_013	3	8,00	5,41E-08
120	w_013	4	9,00	1,77E-02
121	w_013	5	13,00	2,24E-04
122	w_013	6	18,00	1,02E-02
123	w_013	8	21,50	2,24E-04
124	w_014	1	4,00	4,06E-04
125	w_014	2	7,00	5,41E-08
126	w_014	4	15,00	5,38E-03
127	w_014	5	16,00	8,21E-03
128	w_014	6	19,00	3,50E-04
129	w_014	8	20,50	8,21E-03
130	w_015_GWM_50070	1	3,00	5,41E-08
131	w_015_GWM_50070	2	4,00	7,80E-05
132	w_015_GWM_50070	4	6,00	1,91E-04
133	w_015_GWM_50070	5	7,00	0,00E+00
134	w_015_GWM_50070	6	8,00	7,80E-05
135	w_015_GWM_50070	7	12,00	2,67E-03
136	w_015_GWM_50070	8	13,00	1,77E-02

Anhang, Tab. A4: Durchlässigkeitsbeiwerte aus petrographischen Schichtbeschreibungen
(Teil 4)

KF Nr.	Name der Bohrung im Modell	Schicht Nr.	Schicht reicht bis in eine Tiefe von [m un- ter Bohransatz]	Durchlässigkeitsbeiwert Białas und Kleczkowski (1970) [m/s]
137	w_015_GWM_50070	9	17,00	2,67E-03
138	w_015_GWM_50070	10	21,00	4,79E-02
139	w_015_GWM_50070	11	23,00	2,67E-03
140	w_015_GWM_50070	12	23,50	4,49E-03
141	w_016	1	2,00	5,41E-08
142	w_016	2	3,00	5,41E-08
143	w_016	3	5,00	0,00E+00
144	w_016	4	7,00	1,77E-02
145	w_016	5	9,00	4,49E-03
146	w_016	6	11,00	4,30E-04
147	w_016	7	15,00	1,02E-02
148	w_016	8	18,00	1,99E-04
149	w_016	9	19,00	7,31E-03
150	w_016	10	20,00	2,75E-04
151	w_016	11	22,00	1,02E-02
152	w_017	1	2,00	1,60E-05
153	w_017	2	4,00	1,99E-04
154	w_017	3	11,00	9,53E-04
155	w_017	4	16,00	2,99E-03
156	w_017	5	18,00	1,77E-02
157	w_017	6	18,50	7,55E+00
158	w_018	1	1,00	1,14E-05
159	w_018	3	6,00	1,65E-02
160	w_018	4	7,00	1,77E-02
161	w_018	5	9,00	2,67E-03
162	w_018	6	13,00	9,53E-04
163	w_019	1	0,60	0,00E+00
164	w_019	2	1,40	1,91E-04
165	w_019	3	2,20	0,00E+00
166	w_019	4	2,60	0,00E+00
167	w_019	5	3,10	0,00E+00
168	w_019	6	4,00	0,00E+00
169	w_019	7	12,00	6,98E-02
170	w_019	8	25,00	7,55E+00
171	w_019	9	30,00	9,89E-01
172	w_022	1	0,30	1,34E-05
173	w_022	2	1,50	1,94E-04
174	w_022	3	2,50	7,52E-05
175	w_022	4	5,00	1,94E-04
176	w_025	1	0,30	1,34E-05
177	w_025	2	5,20	1,94E-04
178	w_028	2	0,08	7,80E-05
179	w_028	3	1,00	7,80E-05
180	w_028	4	1,60	1,45E-05
181	w_028	5	2,30	4,04E-05

Anhang, Tab. A4: Durchlässigkeitsbeiwerte aus petrographischen Schichtbeschreibungen
(Teil 5)

KF Nr.	Name der Bohrung im Modell	Schicht Nr.	Schicht reicht bis in eine Tiefe von [m unter Bohransatz]	Durchlässigkeitsbeiwert Białas und Kleczkowski (1970) [m/s]
182	w_028	6	3,00	3,98E-08
183	w_028	7	3,50	3,50E-04
184	w_028	9	4,00	3,50E-04
185	w_028	11	4,50	7,80E-05
186	w_028	13	10,40	3,50E-04
187	w_028	14	11,00	1,51E-04
188	w_028	15	11,40	2,24E-04
189	w_028	16	12,00	2,12E-04
190	w_029	1	0,10	1,91E-04
191	w_029	2	0,50	1,34E-05
192	w_029	3	2,30	1,72E-05
193	w_029	5	2,50	0,00E+00
194	w_029	6	3,40	0,00E+00
195	w_029	7	5,00	4,75E-06
196	w_029	9	5,20	3,98E-08
197	w_029	10	6,00	4,75E-06
198	w_029	12	6,30	1,41E-06
199	w_029	13	6,70	1,34E-05
200	w_029	14	7,00	2,73E-04
201	w_029	17	11,40	4,10E-04
202	w_029	18	12,70	2,73E-04
203	w_029	19	13,50	2,04E-04
204	w_029	21	14,00	4,30E-04
205	w_030	1	0,14	7,80E-05
206	w_030	2	0,80	4,51E-05
207	w_030	3	1,10	4,04E-05
208	w_030	4	1,30	3,98E-08
209	w_030	5	1,40	0,00E+00
210	w_030	6	1,70	0,00E+00
211	w_030	7	1,80	3,98E-08
212	w_030	8	1,85	0,00E+00
213	w_030	9	2,10	0,00E+00
214	w_030	11	3,20	0,00E+00
215	w_030	13	3,80	0,00E+00
216	w_030	15	4,20	1,41E-06
217	w_030	17	5,00	7,80E-05
218	w_030	19	5,50	3,50E-04
219	w_030	20	5,70	3,50E-04
220	w_030	21	6,50	3,18E-04
221	w_030	22	9,00	3,50E-04
222	w_030	23	9,70	3,50E-04
223	w_030	24	11,60	3,50E-04
224	w_030	25	12,00	7,61E-05
225	w_031	2	0,16	4,04E-05
226	w_031	3	0,60	4,04E-05

Anhang, Tab. A4: Durchlässigkeitsbeiwerte aus petrographischen Schichtbeschreibungen
(Teil 6)

KF Nr.	Name der Bohrung im Modell	Schicht Nr.	Schicht reicht bis in eine Tiefe von [m un- ter Bohransatz]	Durchlässigkeitsbeiwert Białas und Kleczkowski (1970) [m/s]
227	w_031	6	0,80	2,49E-05
228	w_031	7	1,00	7,80E-05
229	w_031	9	1,60	7,80E-05
230	w_031	10	1,75	3,98E-08
231	w_031	11	2,20	0,00E+00
232	w_031	14	2,80	3,98E-08
233	w_031	16	3,40	3,98E-08
234	w_031	18	4,00	1,34E-05
235	w_031	20	5,00	7,71E-05
236	w_031	25	6,50	2,12E-04
237	w_031	26	8,00	4,04E-05
238	w_032	3	0,20	1,34E-05
239	w_032	4	0,60	1,34E-05
240	w_032	5	0,80	1,34E-05
241	w_032	6	1,50	1,34E-05
242	w_032	7	1,80	1,14E-05
243	w_032	9	2,60	0,00E+00
244	w_032	11	3,60	0,00E+00
245	w_032	12	4,10	0,00E+00
246	w_032	13	4,30	7,80E-05
247	w_032	16	6,00	4,04E-05
248	w_032	19	8,60	3,50E-04
249	w_032	20	11,70	3,50E-04
250	w_032	21	12,00	2,40E-04
251	w_033	1	0,30	5,79E-06
252	w_033	2	1,10	5,79E-06
253	w_033	4	1,40	5,41E-08
254	w_033	6	2,50	7,52E-05
255	w_035_GWM_50158	1	1,00	6,46E-06
256	w_035_GWM_50158	2	2,20	3,50E-04
257	w_035_GWM_50158	3	5,00	2,40E-04
258	w_035_GWM_50158	4	6,00	2,40E-04
259	w_035_GWM_50158	5	8,00	3,50E-04
260	w_035_GWM_50158	6	10,00	3,02E-03
261	w_035_GWM_50158	7	15,00	3,50E-04
262	w_035_GWM_50158	8	22,00	3,02E-03
263	w_035_GWM_50158	9	26,00	3,02E-03
264	w_035_GWM_50158	10	30,15	3,50E-04
265	w_035_GWM_50158	11	30,40	3,98E-08
266	w_035_GWM_50158	13	30,87	3,50E-04
267	w_035_GWM_50158	14	31,08	3,98E-08
268	w_035_GWM_50158	15	34,70	3,50E-04
269	w_035_GWM_50158	16	35,00	3,50E-04
270	w_035_GWM_50158	18	37,40	3,50E-04
271	w_035_GWM_50158	19	37,90	3,50E-04

Anhang, Tab. A4: Durchlässigkeitsbeiwerte aus petrographischen Schichtbeschreibungen
(Teil 7)

KF Nr.	Name der Bohrung im Modell	Schicht Nr.	Schicht reicht bis in eine Tiefe von [m unter Bohransatz]	Durchlässigkeitsbeiwert Białas und Kleczkowski (1970) [m/s]
272	w_035_GWM_50158	20	38,50	3,50E-04
273	w_035_GWM_50158	21	39,00	3,50E-04
274	w_035_GWM_50158	22	39,70	3,50E-04
275	w_035_GWM_50158	23	40,07	3,50E-04
276	w_035_GWM_50158	25	41,00	3,50E-04
277	w_035_GWM_50158	26	44,60	3,50E-04
278	w_035_GWM_50158	28	45,00	0,00E+00
279	w_037	1	0,60	1,34E-05
280	w_037	2	2,20	1,34E-05
281	w_037	3	3,50	0,00E+00
282	w_037	4	4,60	1,64E-04
283	w_037	5	5,00	3,98E-08
284	w_037	6	7,30	0,00E+00
285	w_037	7	15,00	2,40E-04
286	w_037	8	15,50	0,00E+00
287	w_037	9	16,00	0,00E+00
288	w_037	10	16,50	0,00E+00
289	w_037	11	17,00	0,00E+00
290	w_037	12	18,00	0,00E+00
291	w_037	13	19,00	0,00E+00
292	w_037	14	20,00	0,00E+00
293	w_037	15	27,90	4,31E-03
294	w_038	1	0,70	7,80E-05
295	w_038	2	5,00	2,62E-04
296	w_038	3	9,30	1,91E-04
297	w_038	5	10,00	0,00E+00
298	w_038	6	10,50	0,00E+00
299	w_038	7	10,90	0,00E+00
300	w_038	8	16,00	3,19E-03
301	w_038	9	21,90	2,12E-04
302	w_039	2	2,00	7,52E-05
303	w_039	3	6,00	7,52E-05
304	w_039	4	10,00	7,52E-05
305	w_039	5	11,00	7,52E-05
306	w_039	6	13,50	7,55E+00
307	w_040	1	1,00	7,52E-05
308	w_040	2	2,00	8,89E-05
309	w_040	3	4,00	2,40E-04
310	w_040	4	5,00	2,40E-04
311	w_040	5	6,00	3,50E-04
312	w_040	6	10,00	2,12E-03
313	w_040	7	11,00	1,09E-03
314	w_040	8	20,00	2,67E-03
315	w_040	9	21,00	2,12E-03
316	w_040	10	26,00	1,02E-02

Anhang, Tab. A4: Durchlässigkeitsbeiwerte aus petrographischen Schichtbeschreibungen
(Teil 8)

KF Nr.	Name der Bohrung im Modell	Schicht Nr.	Schicht reicht bis in eine Tiefe von [m un- ter Bohransatz]	Durchlässigkeitsbeiwert Białas und Kleczkowski (1970) [m/s]
317	w_040	11	29,00	2,67E-03
318	w_040	12	30,00	1,09E-03
319	w_040	13	38,00	4,30E-04
320	w_040	14	39,00	2,04E-04
321	w_040	15	41,00	1,09E-03
322	w_040	16	42,00	2,67E-03
323	w_040	17	43,00	7,52E-05
324	w_040	18	45,00	1,72E-05
325	w_040	19	48,00	7,80E-05
326	w_040	20	55,00	1,77E-04
327	w_040	21	58,00	1,77E-04
328	w_040	22	59,00	0,00E+00
329	w_040	23	66,00	0,00E+00
330	w_041	1	1,00	1,72E-05
331	w_041	2	2,00	2,15E-05
332	w_041	3	3,00	2,85E-05
333	w_041	4	4,00	3,98E-08
334	w_041	5	5,00	7,52E-05
335	w_041	6	7,00	2,12E-03
336	w_041	7	8,00	2,04E-04
337	w_041	8	11,00	2,40E-04
338	w_041	9	12,00	3,50E-04
339	w_041	10	13,00	1,09E-03
340	w_041	11	14,00	2,04E-04
341	w_041	12	15,00	2,40E-04
342	w_041	13	16,00	2,40E-04
343	w_041	14	18,00	2,40E-04
344	w_041	15	19,00	2,47E-03
345	w_041	17	19,99	2,04E-04
346	w_042_GWM_50042	1	1,00	2,12E-04
347	w_042_GWM_50042	2	2,00	2,40E-04
348	w_042_GWM_50042	3	3,00	1,05E-03
349	w_042_GWM_50042	4	4,00	1,87E-03
350	w_042_GWM_50042	5	5,00	3,50E-04
351	w_042_GWM_50042	9	6,00	1,09E-03
352	w_042_GWM_50042	10	7,00	1,05E-03
353	w_042_GWM_50042	11	8,00	3,36E-03
354	w_042_GWM_50042	12	10,00	1,05E-03
355	w_042_GWM_50042	13	15,00	1,05E-03
356	w_042_GWM_50042	14	17,00	3,50E-04
357	w_042_GWM_50042	15	18,00	1,77E-02
358	w_042_GWM_50042	16	19,00	1,09E-03
359	w_042_GWM_50042	17	20,00	1,25E-03
360	w_042_GWM_50042	18	21,00	4,30E-04
361	w_042_GWM_50042	19	22,00	1,09E-03

Anhang, Tab. A4: Durchlässigkeitsbeiwerte aus petrographischen Schichtbeschreibungen
(Teil 9)

KF Nr.	Name der Bohrung im Modell	Schicht Nr.	Schicht reicht bis in eine Tiefe von [m unter Bohransatz]	Durchlässigkeitsbeiwert Białas und Kleczkowski (1970) [m/s]
362	w_042_GWM_50042	20	24,00	1,05E-03
363	w_042_GWM_50042	21	25,00	7,80E-05
364	w_042_GWM_50042	22	29,00	1,25E-03
365	w_042_GWM_50042	23	30,00	1,65E-02
366	w_043_Brunnen_16	1	2,00	7,71E-05
367	w_043_Brunnen_16	2	3,00	2,24E-04
368	w_043_Brunnen_16	3	4,00	1,60E-04
369	w_043_Brunnen_16	4	5,00	2,40E-04
370	w_043_Brunnen_16	5	6,00	3,03E-04
371	w_043_Brunnen_16	7	7,00	1,51E-04
372	w_043_Brunnen_16	8	8,00	2,85E-04
373	w_043_Brunnen_16	9	9,00	3,23E-03
374	w_043_Brunnen_16	10	10,00	5,57E-02
375	w_043_Brunnen_16	11	11,00	1,58E-04
376	w_043_Brunnen_16	12	12,00	1,58E-04
377	w_043_Brunnen_16	13	14,00	1,58E-04
378	w_043_Brunnen_16	14	15,00	2,40E-04
379	w_043_Brunnen_16	15	16,00	4,75E-06
380	w_043_Brunnen_16	16	18,00	4,30E-04
381	w_043_Brunnen_16	17	19,00	4,30E-04
382	w_043_Brunnen_16	18	21,00	4,30E-04
383	w_043_Brunnen_16	19	22,00	3,69E-03
384	w_043_Brunnen_16	20	23,00	5,81E-03
385	w_043_Brunnen_16	21	24,00	1,45E-05
386	w_043_Brunnen_16	22	25,00	2,49E-05
387	w_043_Brunnen_16	26	26,00	3,50E-04
388	w_043_Brunnen_16	27	29,00	3,50E-04
389	w_043_Brunnen_16	28	30,00	3,50E-04
390	w_043_Brunnen_16	29	31,00	3,98E-04
391	w_043_Brunnen_16	30	32,00	1,58E-04
392	w_043_Brunnen_16	31	33,00	4,04E-05
393	w_043_Brunnen_16	32	34,00	1,91E-04
394	w_043_Brunnen_16	34	35,00	3,50E-04
395	w_043_Brunnen_16	36	38,00	2,40E-04
396	w_043_Brunnen_16	37	39,00	1,09E-03
397	w_043_Brunnen_16	38	40,00	3,50E-04
398	w_043_Brunnen_16	39	41,00	1,09E-03
399	w_043_Brunnen_16	40	43,00	3,50E-04
400	w_043_Brunnen_16	41	45,00	3,50E-04
401	w_043_Brunnen_16	42	46,00	2,40E-04
402	w_043_Brunnen_16	43	47,00	2,04E-04
403	w_043_Brunnen_16	44	48,00	2,49E-05
404	w_043_Brunnen_16	45	49,00	1,80E-05
405	w_043_Brunnen_16	46	50,50	1,53E-05
406	w_044_Brunnen_17	1	1,20	4,06E-04

Anhang, Tab. A4: Durchlässigkeitsbeiwerte aus petrographischen Schichtbeschreibungen
(Teil 10)

KF Nr.	Name der Bohrung im Modell	Schicht Nr.	Schicht reicht bis in eine Tiefe von [m unter Bohransatz]	Durchlässigkeitsbeiwert Białas und Kleczkowski (1970) [m/s]
407	w_044_Brunnen_17	2	5,00	2,38E-04
408	w_044_Brunnen_17	3	6,00	2,38E-04
409	w_044_Brunnen_17	4	7,00	7,80E-05
410	w_044_Brunnen_17	5	8,00	3,50E-04
411	w_044_Brunnen_17	6	9,00	2,40E-04
412	w_044_Brunnen_17	7	10,00	2,40E-04
413	w_044_Brunnen_17	8	12,00	2,04E-04
414	w_044_Brunnen_17	9	13,00	5,41E-08
415	w_044_Brunnen_17	10	15,00	2,12E-04
416	w_044_Brunnen_17	11	16,00	4,30E-04
417	w_044_Brunnen_17	12	18,00	0,00E+00
418	w_044_Brunnen_17	13	19,00	0,00E+00
419	w_044_Brunnen_17	14	20,00	0,00E+00
420	w_044_Brunnen_17	15	23,00	0,00E+00
421	w_044_Brunnen_17	16	25,00	1,91E-04
422	w_044_Brunnen_17	17	26,00	2,12E-03
423	w_044_Brunnen_17	18	27,00	2,12E-03
424	w_044_Brunnen_17	19	28,00	1,09E-03
425	w_044_Brunnen_17	21	29,00	1,09E-03
426	w_044_Brunnen_17	22	30,00	1,09E-03
427	w_044_Brunnen_17	23	31,00	1,06E-03
428	w_044_Brunnen_17	24	32,00	1,09E-03
429	w_044_Brunnen_17	25	33,00	3,50E-04
430	w_044_Brunnen_17	28	34,00	2,40E-04
431	w_044_Brunnen_17	29	38,00	2,40E-04
432	w_044_Brunnen_17	30	39,00	1,09E-03
433	w_044_Brunnen_17	32	41,00	1,09E-03
434	w_044_Brunnen_17	35	43,00	3,50E-04
435	w_044_Brunnen_17	38	45,00	1,09E-03
436	w_044_Brunnen_17	40	47,00	1,09E-03
437	w_045	1	0,25	4,75E-06
438	w_045	2	1,10	1,34E-05
439	w_045	3	2,30	2,67E-03
440	w_045	4	3,00	0,00E+00
441	w_045	5	6,00	4,75E-06
442	w_045	6	7,20	3,50E-04
443	w_045	7	8,00	0,00E+00
444	w_045	8	11,10	0,00E+00
445	w_045	10	11,90	3,98E-08
446	w_045	11	13,00	6,23E-06
447	w_045	12	13,80	3,50E-04
448	w_045	13	14,90	3,50E-04
449	w_045	14	16,00	0,00E+00
450	w_045	15	17,30	3,50E-04
451	w_045	16	18,10	1,02E-02

Anhang, Tab. A4: Durchlässigkeitsbeiwerte aus petrographischen Schichtbeschreibungen
(Teil 11)

KF Nr.	Name der Bohrung im Modell	Schicht Nr.	Schicht reicht bis in eine Tiefe von [m unter Bohransatz]	Durchlässigkeitsbeiwert Białas und Kleczkowski (1970) [m/s]
452	w_045	17	19,00	2,67E-03
453	w_045	18	21,20	5,38E-03
454	w_045	19	25,00	2,04E-04
455	w_045	20	26,00	3,50E-04
456	w_045	21	29,10	1,80E-05
457	w_045	22	31,00	1,65E-02
458	w_045	23	32,00	2,67E-03
459	w_045	24	33,40	3,50E-04
460	w_046	1	3,00	3,98E-08
461	w_046	2	5,00	2,40E-04
462	w_046	3	8,00	0,00E+00
463	w_046	4	10,00	2,04E-04
464	w_046	5	15,00	3,50E-04
465	w_046	6	16,00	3,50E-04
466	w_046	7	18,00	0,00E+00
467	w_046	8	21,00	3,50E-04
468	w_046	10	31,50	1,02E-02
469	w_047	1	1,00	3,98E-08
470	w_047	2	5,00	0,00E+00
471	w_047	3	6,00	0,00E+00
472	w_047	4	8,00	0,00E+00
473	w_047	5	11,00	7,71E-05
474	w_047	6	12,00	2,04E-04
475	w_047	7	15,00	7,71E-05
476	w_047	8	16,00	4,97E-03
477	w_047	9	19,00	0,00E+00
478	w_047	10	20,00	2,67E-03
479	w_047	11	23,00	0,00E+00
480	w_047	12	25,00	3,50E-04
481	w_047	13	28,00	2,67E-03
482	w_047	14	30,00	1,02E-02
483	w_047	15	32,00	2,67E-03
484	w_047	16	32,50	1,02E-02
485	w_048	1	1,00	3,98E-08
486	w_048	2	7,00	3,50E-04
487	w_048	3	9,00	2,67E-03
488	w_048	4	10,00	3,50E-04
489	w_048	5	12,00	0,00E+00
490	w_048	6	14,00	0,00E+00
491	w_048	7	19,00	1,77E-02
492	w_048	8	22,00	2,67E-03
493	w_048	9	27,50	1,02E-02
494	w_049	1	6,00	3,50E-04
495	w_049	2	7,00	4,75E-06
496	w_049	3	9,00	3,50E-04

Anhang, Tab. A4: Durchlässigkeitsbeiwerte aus petrographischen Schichtbeschreibungen
(Teil 12)

KF Nr.	Name der Bohrung im Modell	Schicht Nr.	Schicht reicht bis in eine Tiefe von [m un- ter Bohransatz]	Durchlässigkeitsbeiwert Białas und Kleczkowski (1970) [m/s]
497	w_049	4	10,00	6,46E-06
498	w_049	5	13,00	0,00E+00
499	w_049	6	17,00	6,23E-06
500	w_049	7	21,00	1,77E-02
501	w_049	8	25,00	1,09E-03
502	w_049	9	26,50	1,77E-02
503	w_050	1	1,00	3,50E-04
504	w_050	2	2,00	0,00E+00
505	w_050	3	3,00	7,10E-08
506	w_050	4	8,00	2,40E-04
507	w_050	5	10,00	0,00E+00
508	w_050	6	15,00	3,50E-04
509	w_050	7	19,00	1,09E-01
510	w_050	8	25,00	3,50E-04
511	w_050	9	29,00	1,09E-01
512	w_051	1	0,20	2,49E-05
513	w_051	2	3,00	0,00E+00
514	w_051	3	5,00	0,00E+00
515	w_051	4	6,00	3,50E-04
516	w_051	5	8,00	0,00E+00
517	w_051	6	13,00	2,54E-04
518	w_051	7	14,00	8,88E-07
519	w_051	8	16,00	0,00E+00
520	w_051	9	19,00	2,67E-03
521	w_051	10	24,00	3,50E-04
522	w_051	11	26,00	4,01E-06
523	w_051	12	29,00	1,52E-03
524	w_051	13	30,50	9,18E-04
525	w_052	1	2,00	4,75E-06
526	w_052	2	4,00	4,75E-06
527	w_052	3	5,00	2,67E-03
528	w_052	4	9,00	0,00E+00
529	w_052	5	11,00	3,50E-04
530	w_052	6	12,50	0,00E+00
531	w_052	7	17,00	2,67E-03
532	w_052	8	19,00	2,67E-03
533	w_052	9	23,00	3,50E-04
534	w_052	10	26,00	7,55E+00
535	w_052	11	27,50	1,02E-02
536	w_053_GWM_50065	1	1,00	3,50E-04
537	w_053_GWM_50065	2	2,00	3,98E-08
538	w_053_GWM_50065	3	7,00	3,75E-04
539	w_053_GWM_50065	4	10,00	3,98E-08
540	w_053_GWM_50065	5	13,00	0,00E+00
541	w_053_GWM_50065	6	15,00	7,80E-05

Anhang, Tab. A4: Durchlässigkeitsbeiwerte aus petrographischen Schichtbeschreibungen
(Teil 13)

KF Nr.	Name der Bohrung im Modell	Schicht Nr.	Schicht reicht bis in eine Tiefe von [m unter Bohransatz]	Durchlässigkeitsbeiwert Białas und Kleczkowski (1970) [m/s]
542	w_053_GWM_50065	7	16,00	4,30E-04
543	w_053_GWM_50065	8	19,00	2,09E-01
544	w_053_GWM_50065	9	20,00	1,91E-04
545	w_053_GWM_50065	10	22,00	4,30E-04
546	w_053_GWM_50065	11	24,00	3,50E-04
547	w_053_GWM_50065	12	26,00	9,53E-04
548	w_053_GWM_50065	13	27,50	1,07E-03
549	w_054_GWM_50066	1	2,00	2,15E-05
550	w_054_GWM_50066	2	6,00	0,00E+00
551	w_054_GWM_50066	3	8,00	2,73E-04
552	w_054_GWM_50066	4	9,00	0,00E+00
553	w_054_GWM_50066	5	10,00	0,00E+00
554	w_054_GWM_50066	6	11,00	3,50E-04
555	w_054_GWM_50066	7	14,00	0,00E+00
556	w_054_GWM_50066	8	17,00	1,02E-02
557	w_054_GWM_50066	9	23,00	3,50E-04
558	w_054_GWM_50066	10	25,50	1,02E-02
559	w_055	1	2,00	4,75E-06
560	w_055	2	3,00	0,00E+00
561	w_055	3	9,00	2,88E-03
562	w_055	5	13,00	3,07E-05
563	w_055	6	17,00	2,49E-05
564	w_055	7	19,00	1,73E-04
565	w_056	1	2,00	1,41E-06
566	w_056	2	5,00	9,18E-04
567	w_056	3	10,00	5,33E-01
568	w_056	4	12,00	3,98E-08
569	w_056	5	13,00	3,98E-08
570	w_056	6	15,50	1,24E-03
571	w_057	1	1,00	1,41E-06
572	w_057	2	6,00	9,18E-04
573	w_057	3	8,00	3,50E-04
574	w_057	4	11,00	3,50E-04
575	w_057	5	14,50	7,80E-05
576	w_058	1	1,00	1,65E-02
577	w_058	2	2,00	3,98E-08
578	w_058	3	3,00	5,41E-08
579	w_058	4	4,00	6,46E-06
580	w_058	5	5,00	1,18E-05
581	w_058	6	7,00	2,49E-05
582	w_058	7	10,00	2,49E-05
583	w_058	8	13,50	2,88E-03
584	w_059	1	1,00	1,34E-05
585	w_059	2	2,00	1,14E-05
586	w_059	3	5,00	1,02E-02

Anhang, Tab. A4: Durchlässigkeitsbeiwerte aus petrographischen Schichtbeschreibungen
(Teil 14)

KF Nr.	Name der Bohrung im Modell	Schicht Nr.	Schicht reicht bis in eine Tiefe von [m un- ter Bohransatz]	Durchlässigkeitsbeiwert Białas und Kleczkowski (1970) [m/s]
587	w_059	4	6,00	4,75E-06
588	w_059	5	13,00	3,50E-04
589	w_059	6	14,00	1,02E-02
590	w_060	1	0,70	1,45E-05
591	w_060	2	1,60	1,09E-03
592	w_060	3	2,00	7,80E-05
593	w_060	4	3,30	2,40E-04
594	w_060	5	4,50	1,09E-03
595	w_060	6	7,00	3,50E-04
596	w_060	7	12,40	1,91E-04
597	w_060	8	13,20	1,91E-04
598	w_060	9	14,00	1,91E-04
599	w_060	10	14,70	1,91E-04
600	w_060	11	15,50	4,30E-04
601	w_061	1	1,30	3,98E-08
602	w_061	2	3,80	7,52E-05
603	w_061	3	7,00	2,09E-01
604	w_061	4	10,20	1,02E-02
605	w_061	5	16,80	1,94E-04
606	w_061	6	22,30	1,02E-02
607	w_061	7	29,50	1,94E-04
608	w_061	8	34,80	7,52E-05
609	w_061	9	40,00	1,94E-04
610	w_062	2	1,10	7,52E-05
611	w_062	3	1,40	3,98E-08
612	w_062	4	2,10	1,36E-04
613	w_062	5	2,90	1,09E-01
614	w_062	6	11,50	1,94E-04
615	w_062	7	16,70	1,02E-02
616	w_062	8	24,30	5,44E-01
617	w_062	9	44,40	7,52E-05
618	w_062	10	45,20	3,98E-08
619	w_062	11	45,40	7,52E-05
620	w_063	1	0,30	0,00E+00
621	w_063	2	2,20	7,80E-05
622	w_063	4	3,30	4,04E-05
623	w_063	5	3,90	7,80E-05
624	w_063	6	4,70	7,52E-05
625	w_063	7	6,20	1,34E-05
626	w_063	10	6,80	7,80E-05
627	w_063	11	7,30	5,41E-08
628	w_063	12	9,20	1,34E-05
629	w_063	14	9,70	4,04E-05
630	w_063	15	12,30	7,80E-05
631	w_063	16	13,20	1,94E-04

Anhang, Tab. A4: Durchlässigkeitsbeiwerte aus petrographischen Schichtbeschreibungen
(Teil 15)

KF Nr.	Name der Bohrung im Modell	Schicht Nr.	Schicht reicht bis in eine Tiefe von [m unter Bohransatz]	Durchlässigkeitsbeiwert Białas und Kleczkowski (1970) [m/s]
632	w_063	17	14,50	1,94E-04
633	w_063	18	20,00	1,94E-04
634	w_064	1	0,10	5,41E-08
635	w_064	2	1,30	2,15E-05
636	w_064	3	5,20	4,04E-05
637	w_064	4	12,00	1,64E-04
638	w_064	5	14,20	4,04E-05
639	w_064	6	20,00	7,52E-05
640	w_066	1	0,20	5,41E-08
641	w_066	2	4,00	2,15E-05
642	w_066	3	7,50	1,42E-05
643	w_066	6	11,70	3,98E-08
644	w_066	7	12,80	7,80E-05
645	w_066	8	14,20	4,04E-05
646	w_066	9	16,50	1,45E-05
647	w_066	10	17,90	1,94E-04
648	w_066	11	20,00	1,09E-01
649	w_067	2	1,70	7,52E-05
650	w_067	4	4,00	7,52E-05
651	w_067	5	5,20	2,09E-01
652	w_067	8	12,00	3,81E-02
653	w_067	9	15,00	7,55E+00
654	w_068	2	10,00	5,33E-01
655	w_068	4	15,50	7,55E+00
656	w_069	2	2,00	3,81E-02
657	w_069	3	4,00	3,81E-02
658	w_069	4	7,00	7,55E+00
659	w_069	5	9,50	5,33E-01
660	w_069	6	14,00	7,55E+00
661	w_070	2	2,00	7,52E-05
662	w_070	3	6,00	7,52E-05
663	w_070	4	10,00	7,52E-05
664	w_070	5	11,00	7,52E-05
665	w_070	6	13,50	7,55E+00
666	w_071_GWM_50169	1	0,20	6,46E-06
667	w_071_GWM_50169	2	0,80	2,49E-05
668	w_071_GWM_50169	3	1,20	1,02E-02
669	w_071_GWM_50169	4	2,20	7,80E-05
670	w_071_GWM_50169	5	2,70	3,98E-08
671	w_071_GWM_50169	6	3,60	3,50E-04
672	w_071_GWM_50169	7	4,10	7,80E-05
673	w_071_GWM_50169	8	5,00	2,93E-03
674	w_071_GWM_50169	9	7,00	1,05E-03
675	w_071_GWM_50169	10	8,00	1,09E-03
676	w_071_GWM_50169	11	10,00	4,30E-04

Anhang, Tab. A4: Durchlässigkeitsbeiwerte aus petrographischen Schichtbeschreibungen
(Teil 16)

KF Nr.	Name der Bohrung im Modell	Schicht Nr.	Schicht reicht bis in eine Tiefe von [m un- ter Bohransatz]	Durchlässigkeitsbeiwert Białas und Kleczkowski (1970) [m/s]
677	w_071_GWM_50169	12	12,00	5,44E-01
678	w_071_GWM_50169	13	13,00	1,09E-03
679	w_071_GWM_50169	14	17,00	1,02E-02
680	w_071_GWM_50169	15	20,00	5,44E-01
681	w_072_GWM_50165	1	0,20	4,51E-05
682	w_072_GWM_50165	2	0,50	4,30E-04
683	w_072_GWM_50165	3	1,60	4,04E-03
684	w_072_GWM_50165	4	2,10	4,30E-04
685	w_072_GWM_50165	5	3,00	2,54E-04
686	w_072_GWM_50165	6	3,70	2,12E-04
687	w_072_GWM_50165	7	3,90	4,30E-04
688	w_072_GWM_50165	8	4,70	7,52E-05
689	w_072_GWM_50165	10	4,90	3,50E-04
690	w_072_GWM_50165	11	5,60	3,50E-04
691	w_072_GWM_50165	12	7,00	3,50E-04
692	w_072_GWM_50165	13	11,00	2,40E-04
693	w_072_GWM_50165	14	14,00	1,49E-03
694	w_072_GWM_50165	15	16,00	3,50E-04
695	w_072_GWM_50165	16	17,00	1,02E-02
696	w_072_GWM_50165	17	20,00	0,00E+00
697	w_072_GWM_50165	18	21,00	3,98E-08
698	w_072_GWM_50165	19	23,00	4,30E-04
699	w_072_GWM_50165	21	24,00	2,04E-04
700	w_073_GWM_50163	2	0,80	1,80E-05
701	w_073_GWM_50163	3	2,00	1,88E-04
702	w_073_GWM_50163	4	3,00	1,24E-03
703	w_073_GWM_50163	5	7,00	3,50E-04
704	w_073_GWM_50163	6	18,00	2,24E-04
705	w_073_GWM_50163	7	19,80	0,00E+00
706	w_073_GWM_50163	8	20,30	2,09E-01
707	w_073_GWM_50163	10	25,00	1,73E-01
708	w_074	1	1,00	2,49E-05
709	w_074	2	2,00	2,49E-05
710	w_074	3	5,50	1,09E-03
711	w_074	5	9,00	2,12E-04
712	w_074	6	10,50	3,50E-04
713	w_074	7	13,10	2,40E-04
714	w_074	8	14,00	7,80E-05
715	w_074	9	17,75	1,86E-04
716	w_074	10	20,00	7,80E-05
717	w_074	11	20,80	1,51E-04
718	w_083_GWM_50157	2	4,00	2,40E-04
719	w_083_GWM_50157	4	15,00	3,50E-04
720	w_083_GWM_50157	6	29,70	3,50E-04
721	w_083_GWM_50157	8	32,60	3,50E-04

Anhang, Tab. A4: Durchlässigkeitsbeiwerte aus petrographischen Schichtbeschreibungen
(Teil 17)

KF Nr.	Name der Bohrung im Modell	Schicht Nr.	Schicht reicht bis in eine Tiefe von [m unter Bohransatz]	Durchlässigkeitsbeiwert Białas und Kleczkowski (1970) [m/s]
722	w_083_GWM_50157	10	44,25	3,50E-04
723	w_084_GWM_50159	2	0,90	1,34E-05
724	w_084_GWM_50159	3	1,60	2,69E-05
725	w_084_GWM_50159	4	2,20	5,41E-08
726	w_084_GWM_50159	5	3,40	2,67E-03
727	w_084_GWM_50159	6	4,50	1,09E-03
728	w_084_GWM_50159	7	5,30	2,67E-03
729	w_084_GWM_50159	8	6,00	2,40E-04
730	w_084_GWM_50159	9	7,00	1,77E-02
731	w_084_GWM_50159	10	8,00	1,77E-02
732	w_084_GWM_50159	11	9,00	1,77E-02
733	w_084_GWM_50159	12	10,00	1,77E-02
734	w_084_GWM_50159	13	11,00	3,50E-04
735	w_084_GWM_50159	14	12,00	3,50E-04
736	w_084_GWM_50159	15	13,00	3,50E-04
737	w_084_GWM_50159	16	14,00	3,50E-04
738	w_084_GWM_50159	17	15,00	3,50E-04
739	w_084_GWM_50159	18	16,00	3,50E-04
740	w_084_GWM_50159	19	17,00	3,50E-04
741	w_084_GWM_50159	20	18,00	3,50E-04
742	w_084_GWM_50159	21	18,10	3,50E-04
743	w_084_GWM_50159	22	19,00	0,00E+00
744	w_084_GWM_50159	23	20,00	0,00E+00
745	w_084_GWM_50159	24	21,00	2,09E-01
746	w_084_GWM_50159	25	22,00	1,02E-02
747	w_084_GWM_50159	26	23,00	1,02E-02
748	w_084_GWM_50159	27	24,00	3,50E-04
749	w_084_GWM_50159	28	25,00	1,02E-02
750	w_086_GWM_50161	1	0,80	6,46E-06
751	w_086_GWM_50161	2	1,00	6,46E-06
752	w_086_GWM_50161	3	2,00	2,49E-05
753	w_086_GWM_50161	4	3,00	7,80E-05
754	w_086_GWM_50161	5	4,00	7,80E-05
755	w_086_GWM_50161	6	5,00	7,80E-05
756	w_086_GWM_50161	7	6,00	2,49E-05
757	w_086_GWM_50161	8	7,00	1,94E-04
758	w_086_GWM_50161	9	8,00	1,94E-04
759	w_086_GWM_50161	10	9,00	1,94E-04
760	w_086_GWM_50161	11	10,00	1,94E-04
761	w_086_GWM_50161	12	11,00	1,94E-04
762	w_086_GWM_50161	13	12,00	0,00E+00
763	w_086_GWM_50161	14	13,00	0,00E+00
764	w_086_GWM_50161	15	14,00	1,65E-02
765	w_086_GWM_50161	16	15,00	1,65E-02
766	w_086_GWM_50161	17	16,00	1,65E-02

Anhang, Tab. A4: Durchlässigkeitsbeiwerte aus petrographischen Schichtbeschreibungen
(Teil 18)

KF Nr.	Name der Bohrung im Modell	Schicht Nr.	Schicht reicht bis in eine Tiefe von [m un- ter Bohransatz]	Durchlässigkeitsbeiwert Białas und Kleczkowski (1970) [m/s]
767	w_086_GWM_50161	18	17,00	1,65E-02
768	w_086_GWM_50161	19	18,00	1,65E-02
769	w_086_GWM_50161	20	19,00	1,65E-02
770	w_086_GWM_50161	21	20,00	1,65E-02
771	w_086_GWM_50161	22	21,00	1,65E-02
772	w_086_GWM_50161	23	22,00	1,65E-02
773	w_086_GWM_50161	24	23,00	1,65E-02
774	w_086_GWM_50161	25	23,50	1,65E-02
775	w_086_GWM_50161	26	24,00	1,65E-02
776	w_086_GWM_50161	27	25,00	1,65E-02
777	w_090_GWM_50167	1	22,40	3,98E-08
778	w_090_GWM_50167	2	23,00	2,04E-04
779	w_090_GWM_50167	3	24,70	2,04E-04
780	w_090_GWM_50167	4	25,00	2,49E-05
781	w_090_GWM_50167	5	26,00	7,52E-05
782	w_090_GWM_50167	6	27,00	7,52E-05
783	w_090_GWM_50167	7	28,00	1,91E-04
784	w_090_GWM_50167	8	29,00	1,91E-04
785	w_091_GWM_50168	2	0,60	2,49E-05
786	w_091_GWM_50168	3	1,30	3,50E-04
787	w_091_GWM_50168	4	2,00	2,49E-05
788	w_091_GWM_50168	5	2,80	1,91E-04
789	w_091_GWM_50168	6	3,40	3,75E-04
790	w_091_GWM_50168	7	4,10	3,36E-03
791	w_091_GWM_50168	8	4,80	2,49E-05
792	w_091_GWM_50168	9	5,80	1,91E-04
793	w_091_GWM_50168	10	6,50	2,49E-05
794	w_091_GWM_50168	11	7,00	2,09E-01
795	w_091_GWM_50168	12	8,00	1,94E-04
796	w_091_GWM_50168	13	9,00	1,97E-04
797	w_091_GWM_50168	14	10,00	2,49E-05
798	w_091_GWM_50168	15	11,00	1,02E-02
799	w_091_GWM_50168	16	12,00	1,91E-04
800	w_091_GWM_50168	17	13,00	2,49E-05
801	w_091_GWM_50168	18	14,00	8,61E-03
802	w_091_GWM_50168	19	15,00	1,02E-02
803	w_091_GWM_50168	20	16,00	5,44E-01
804	w_091_GWM_50168	21	17,00	5,44E-01
805	w_091_GWM_50168	22	18,00	0,00E+00
806	w_091_GWM_50168	23	19,60	0,00E+00
807	w_091_GWM_50168	24	20,10	5,41E-08
808	w_091_GWM_50168	25	21,00	3,50E-04
809	w_093_GWM_50180	1	0,15	1,80E-05
810	w_093_GWM_50180	2	0,70	4,75E-06
811	w_093_GWM_50180	3	1,00	4,56E-06

Anhang, Tab. A4: Durchlässigkeitsbeiwerte aus petrographischen Schichtbeschreibungen
(Teil 19)

KF Nr.	Name der Bohrung im Modell	Schicht Nr.	Schicht reicht bis in eine Tiefe von [m unter Bohransatz]	Durchlässigkeitsbeiwert Białas und Kleczkowski (1970) [m/s]
812	w_093_GWM_50180	4	1,15	2,75E-04
813	w_093_GWM_50180	5	1,50	1,91E-04
814	w_093_GWM_50180	6	2,30	2,54E-04
815	w_093_GWM_50180	7	2,65	1,34E-05
816	w_093_GWM_50180	8	4,00	1,05E-03
817	w_093_GWM_50180	9	4,50	1,09E-03
818	w_093_GWM_50180	10	4,65	1,09E-03
819	w_093_GWM_50180	11	6,00	1,09E-03
820	w_093_GWM_50180	12	7,30	2,38E-03
821	w_093_GWM_50180	13	8,00	0,00E+00
822	w_093_GWM_50180	14	10,50	1,09E-03
823	w_093_GWM_50180	15	11,00	1,09E-03
824	w_093_GWM_50180	16	11,25	3,98E-08
825	w_093_GWM_50180	17	12,00	1,48E-03
826	w_093_GWM_50180	18	12,40	1,09E-03
827	w_093_GWM_50180	19	13,60	1,25E-03
828	w_093_GWM_50180	20	14,45	1,09E-03
829	w_093_GWM_50180	21	17,55	1,09E-03
830	w_093_GWM_50180	22	19,30	3,39E-02
831	w_093_GWM_50180	23	19,60	3,98E-08
832	w_093_GWM_50180	24	22,45	8,21E-03
833	w_093_GWM_50180	25	25,20	1,48E-03
834	w_096_18710	1	1,00	7,71E-05
835	w_096_18710	2	2,00	2,22E-04
836	w_096_18710	3	4,00	2,40E-04
837	w_096_18710	4	6,00	3,50E-04
838	w_096_18710	5	10,00	2,12E-03
839	w_096_18710	6	11,00	1,09E-03
840	w_096_18710	7	19,00	2,67E-03
841	w_096_18710	8	20,00	3,36E-03
842	w_096_18710	9	21,00	1,09E-03
843	w_096_18710	10	28,00	4,37E-02
844	w_096_18710	11	29,00	2,67E-03
845	w_096_18710	12	30,00	1,09E-03
846	w_096_18710	13	38,00	4,30E-04
847	w_096_18710	14	39,00	2,04E-04
848	w_096_18710	15	40,00	2,67E-03
849	w_097_18731	1	0,25	4,75E-06
850	w_097_18731	2	1,10	1,34E-05
851	w_097_18731	3	2,30	2,67E-03
852	w_097_18731	4	3,00	0,00E+00
853	w_097_18731	5	6,00	4,75E-06
854	w_097_18731	6	7,20	3,50E-04
855	w_097_18731	7	8,00	0,00E+00
856	w_097_18731	8	11,10	0,00E+00

Anhang, Tab. A4: Durchlässigkeitsbeiwerte aus petrographischen Schichtbeschreibungen
(Teil 20)

KF Nr.	Name der Bohrung im Modell	Schicht Nr.	Schicht reicht bis in eine Tiefe von [m un- ter Bohransatz]	Durchlässigkeitsbeiwert Białas und Kleczkowski (1970) [m/s]
857	w_097_18731	9	11,90	4,75E-06
858	w_097_18731	10	13,00	6,23E-06
859	w_097_18731	11	13,80	6,23E-06
860	w_097_18731	12	14,90	6,23E-06
861	w_097_18731	13	16,00	0,00E+00
862	w_097_18731	14	17,30	3,50E-04
863	w_097_18731	15	18,10	1,02E-02
864	w_097_18731	16	19,00	2,67E-03
865	w_097_18731	17	21,20	2,67E-03
866	w_097_18731	18	25,00	2,04E-04
867	w_097_18731	19	26,00	3,50E-04
868	w_097_18731	20	29,10	1,80E-05
869	w_097_18731	21	31,00	1,65E-02
870	w_097_18731	22	32,00	2,67E-03
871	w_097_18731	23	33,40	3,50E-04
872	w_098_18775	1	1,30	3,98E-08
873	w_098_18775	2	3,80	7,52E-05
874	w_098_18775	3	7,00	2,09E-01
875	w_098_18775	4	10,20	1,02E-02
876	w_098_18775	5	16,80	1,94E-04
877	w_098_18775	6	22,30	1,02E-02
878	w_098_18775	7	29,50	1,94E-04
879	w_098_18775	8	34,80	7,52E-05
880	w_098_18775	9	40,00	1,94E-04
881	w_099_19025	2	1,70	7,52E-05
882	w_099_19025	3	2,60	0,00E+00
883	w_099_19025	4	4,00	7,52E-05
884	w_099_19025	5	5,20	2,09E-01
885	w_099_19025	6	9,00	3,98E-08
886	w_099_19025	7	9,30	0,00E+00
887	w_099_19025	8	12,00	3,81E-02
888	w_099_19025	9	15,00	7,55E+00
889	w_100_19027	2	2,00	3,81E-02
890	w_100_19027	3	4,00	3,81E-02
891	w_100_19027	4	7,00	7,55E+00
892	w_100_19027	5	9,50	5,33E-01
893	w_100_19027	6	14,00	7,55E+00
894	w_101_19028	2	2,00	7,52E-05
895	w_101_19028	3	11,00	7,52E-05
896	w_101_19028	4	13,50	7,55E+00
897	w_102_20637	1	0,07	2,39E-05
898	w_102_20637	2	2,80	1,85E-05
899	w_103_20883	1	1,80	6,46E-06
900	w_103_20883	2	4,50	7,52E-05

Erklärung

Hiermit versichere ich, dass ich die vorliegende Arbeit – abgesehen von den in ihr ausdrücklich genannten Hilfen – selbstständig verfasst habe.

Die Arbeit ist in gleicher oder ähnlicher Form noch nicht als Prüfungsarbeit eingereicht worden.

Darmstadt, den 1. August 2016

